

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG
DIREKTOR: o. PROF. DR.-ING. KARL KORDINA

Vorläufige Fassung!

B e r i c h t

über

Versuche mit Spanngliedverankerungen im
Innern einer rechteckigen Betonscheibe

erstattet von

AV u. Prof. Dr.-Ing. J. Eibl

und

Dr.-Ing. G. Iványi

1968

Druck
am 10. 11. 1968
in der
Druckerei
G. B. B. Braunschweig

Postsendungen:
Braunschweig, Beethovenstraße 52

Fernsprecher: 478 281
Ordnungszeitl. 0331
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Besuchzeiten:
Montag bis Freitag 8-16 Uhr

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	2
Zusammenfassung	3
1. Aufgabenstellung	4
2. Versuche an rechteckigen Betonscheiben	6
2.1 Beschreibung der Versuchskörper	6
2.1.1 Allgemeines	6
2.1.2 Herstellung der Versuchskörper	7
2.2 Meßeinrichtung	8
2.3 Belastungseinrichtung	9
2.4 Durchführung der Versuche	10
3. Auswertung der Meßergebnisse	13
Literaturverzeichnis	17
Anhang	
Tabelle I - III	
Bilder 1 - 10, 19 - 24, 35 - 47	
Phototafeln I - VII (mit Bildern 11 - 18, 26 - 34)	

Vorwort

Die folgende vorläufige Fassung eines Forschungsberichtes über Versuche mit Spanngliedverankerungen im Innern einer rechteckigen Betonscheibe berichtet über Ergebnisse von 5 bislang durchgeführten Versuchen mit drei verschiedenen Ankerkörpern.

Bei allen Versuchen wurde dabei auf eine rückwärtige Verankerung mit schlaffer Bewehrung, wie sie nach bisher erschienenen Veröffentlichungen notwendig wäre, bewußt verzichtet, um evtl. auftretende Risse ohne Beeinflussung beobachten zu können.

Die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse haben die Verfasser des vorliegenden Berichtes veranlaßt, eine, wie sie glauben, wirklichkeitsnahe Berechnungsmethode für derartige Innenverankerungen zu entwickeln. Die ersten Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den bisher vorliegenden Versuchsergebnissen. Da diese Berechnungen noch nicht abgeschlossen sind, können sie erst in einer geplanten Ergänzung zu diesem Bericht wiedergegeben werden.

Zusammenfassung

Das Problem der Spanngliedverankerungen in scheibenartigen Bauteilen (Trägersteg, Hohlkastenstege etc.) wird in der Regel idealisiert als Einzelkraftangriff im Inneren einer Rechteckscheibe behandelt. Diese Annahme ergibt im Lastangriffspunkt unendlich hohe Zug- und Druckspannungen, was der Wirklichkeit nicht entspricht. Außerdem wird empfohlen, die Resultierende der ermittelten Zugspannungen - ähnlich wie bei Endverankerungen - in voller Höhe mit schlaffer Bewehrung abzudecken.

Dies ist sicher nur richtig, wenn in der Scheibe keine weiteren Spannungen, z.B. aus Biegung oder anderen Spanngliedern, vorhanden sind. Ansonsten müssen die aus der Verankerung herrührenden Zugspannungen mit diesen Spannungen überlagert werden. Die notwendige schlaffe Bewehrung ist aus der verbleibenden resultierenden Zugkraft zu bestimmen. Voraussetzung hierfür ist, daß nicht nur die von der Ankerkraft erzeugte resultierende Zugkraft, sondern auch die Verteilung der Zugspannungen bekannt ist.

Um diese Fragen ohne idealisierende Annahmen zu klären, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zunächst Versuche im Maßstab 1 : 1 an 5 rechteckigen Betonscheiben mit 3 verschiedenen Verankerungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind im vorliegenden Bericht dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die bisherigen Annahmen nicht bestätigt werden. Die Zugspannungen hinter dem Ankerkörper weisen im allgemeinen sehr kleine Werte auf, die bei einer Einzelverankerung ohne schlaffe Bewehrung noch zu keiner Rißbildung führen.

Mit der Entwicklung einer Rechenmethode, die die Ermittlung der tatsächlich vorhandenen Spannungen erlaubt, wurde begonnen. Die bislang vorliegenden Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den durchgeführten Versuchen.

1. Aufgabenstellung

Die Ermittlung des Spannungszustandes im Verankerungsbereich von Spanngliedern muß mit Hilfe der Scheibentheorie erfolgen, da die eindimensionale Betrachtungsweise der Balkentheorie hier keine Aufschlüsse geben kann. Im allgemeinen treten in der Praxis des Spannbetonbaues folgende 3 Fälle - nach der Lage des Ankerkopfes - auf:

- a) Endverankerung,
- b) Verankerung im Innern,
- c) Verankerung am Längsrand des Balkens.

Im Rahmen der vorliegenden, aus Mitteln des Landes Niedersachsen finanzierten Forschungsarbeit sollte die bisher wenig behandelte Art b) der Verankerung experimentell und theoretisch studiert werden.

Eine erste Untersuchung dieses Problems wurde von Müller und Schmidt [5] für verschiedene geometrische Verhältnisse mit Hilfe der Spannungsoptik durchgeführt. Hierbei wurde die Einzelast am Rande einer rechteckigen Öffnung eingeleitet (vgl. Bild 1). Die Zugspannungen wurden - ähnlich wie bei der Endverankerung üblich - zu resultierenden Zugkräften zusammengefaßt, wobei die Hauptzugspannungen entlang mehrerer Drucktrajektorien aufsummiert und gemittelt wurden.

Eine theoretische Untersuchung des Problems stammt von El-Behairy [1], [2], [3]. Er beschreibt den Spannungszustand nahe dem Spannkopf mit Hilfe einer Lösung für die rechteckige Scheibe unter Einzellast im Scheibeninnern. Aus dieser Lösung resultieren, abweichend von der Wirklichkeit, im Lastangriffspunkt unendlich hohe Zug- bzw. Druckspannungen. Der Spannungsverlauf in gewisser Entfernung vom Einleitungspunkt stimmt jedoch mit den spannungsoptischen Ergebnissen gut überein. Ähnlich wie [5] gibt El-Behairy [1] abschließend integrierte Zugkräfte an (vgl. Bild 2), die seiner Meinung nach in jedem Falle in voller Höhe mit schlaffen Stahl abzudecken sind.

Die Autoren der hier diskutierten Arbeiten gehen bei ihrer Empfehlung für die einzulegende Bewehrung davon aus, daß im Einleitungsbereich ausschließlich die Verankerungskraft wirksam ist. Ist jedoch die Ankerkraft des Spanngliedes nicht die einzige Spannungserzeugende, liegen z.B. die Verankerungen in einem bereits vorgedrückten Bereich, so führen diese Empfehlungen zu einer unwirtschaftlichen Bewehrung. In solchen Fällen ist die Angabe einer resultierenden Zugkraft nicht ausreichend. Es ist vielmehr die Kenntnis der von der Ankerkraft hervorgerufenen Zugspannungen erforderlich, da diese zunächst mit den vorhandenen Druckspannungen superponiert werden müssen. Nur die verbleibenden "Restzugspannungen" sind mit Bewehrung abzudecken.

Ein solches Vorgehen setzt jedoch voraus, daß die von der Ankerkraft verursachten Zugspannungen nach Größe und Verteilung bekannt sind. Hierfür genügt die Annahme einer punktförmig angreifenden Einzellast im Scheibeninnern aus bereits diskutierten Gründen nicht. In Wirklichkeit können nämlich vom Spannkopfende nur sehr geringe Zugkräfte durch Haftung direkt auf den anschließenden Beton übertragen werden. Der größte Teil der eingeleiteten Kraft wird an der Spannkopfvorderseite durch räumlich verteilte, endlich große Druckspannungen in die Scheibe eingeleitet. Eine genaue Bestimmung dieser Spannungsverteilung am Spannkopf wird jedoch wegen der Vielfalt der üblichen Spannkopfausbildungen und wegen des mathematisch kaum erfaßbaren räumlichen "Verankerungszustandes" nicht möglich sein. Es erschien deshalb den Verfassern des vorliegenden Berichtes sinnvoll, die Krafteinleitung durch Längsspannungen entlang der Berandung eines dem Lastangriffspunkt umschriebenen Kreises zu simulieren. Dabei kann die Spannungsverteilung der einzelnen Spannköpfe, wie oben erläutert, weitgehend berücksichtigt werden. Die Summe aller Spannungen entlang des Kreisumfangs muß selbstverständlich gleich der gesamten eingeleiteten Vorspannkraft sein.

Es bleibt dabei die Frage, welcher Radius für den Ersatzkreis gewählt werden soll bzw. welche Spannungsverteilung im einzelnen entlang dieses Kreises angesetzt werden muß. Eine Antwort hierauf kann nur auf experimentellem Wege gefunden werden. Dafür wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Modellversuche an Stahlbetonscheiben im Maßstab 1:1 durchgeführt, wobei die von der Ankerkraft verursachten Spannungen nahe dem Einleitungsbereich gemessen wurden.

Im ersten Teil des vorliegenden Forschungsberichtes wird zunächst über diese Versuche berichtet. Die theoretische Auswertung der gewonnenen Ergebnisse erfolgt im Anschluß daran.

2. Versuche an rechteckigen Betonscheiben

2.1 Beschreibung der Versuchskörper

2.1.1 Allgemeines

Die Eintragung der Verankerungskraft sollte im Versuch an rechteckigen Betonscheiben geprüft werden, bei denen die innere Verankerung des Spannstahls ungefähr im Dreitelpunkt der Längsachse lag. Das Spannglied wurde im nichtinjizierten Hüllrohr über die Schmalseite des Rechtecks hinausgeführt und in einem Querhaupt verankert. Zwischen Querhaupt und Betonscheibe wurden jeweils 2 hydraulische Pressen symmetrisch zum Spannglied eingebaut, die sich gegen Querhaupt und Betonkörper abstützten. Mit Hilfe dieser Prüfpresen konnte das in der Betonscheibe verankerte Spannglied bis zur Fließgrenze belastet werden (vgl. Bilder 25 und 27).

In dieser Art wurden bislang zwei Vorspannsysteme mit drei verschiedenen Ankerkopfausbildungen an 5 Versuchskörpern geprüft. Die verwendeten Ankerkörper sind in den Bildern 3 - 5 dargestellt. In 4 Fällen wurden dabei in den Versuchskörpern Spannungen nur durch die Ankerkraft der Spannglieder erzeugt. Beim letzten Versuch wurde

aus bereits erörterten Gründen die Betonscheibe zunächst mit zwei nahe dem Längsrand geführten Spanngliedern zentrisch vorgespannt und dann erst die Ankerkraft eingeleitet (vgl. Bild 17).

Eine Zusammenstellung der verwendeten Spannglieder bzw. Ankerköpfe findet sich in Tafel I.

In Tafel II sind die Abmessungen der Versuchskörper zusammengestellt. Für die hier gewählten Werte waren im einzelnen folgende Überlegungen maßgebend:

- a) Die Dicke der Scheiben wurde in Anlehnung an die jeweils gültige Zulassung des Spannverfahrens - Mindestrandabstand - festgelegt. Abweichend hiervon wurde beim ersten Versuch ein größerer und beim zweiten ein kleinerer Wert für die Scheibendicke gewählt. Bei diesen ersten beiden Testversuchen sollten im Versuch Nr. 1 Risse unbedingt vermieden, im Versuch Nr. 2 unbedingt erzielt werden.
- b) Die Scheibenbreite war aus versuchstechnischen Gründen in allen Fällen 1,35 m.
- c) Für die Bestimmung der Scheibenlänge war die Forderung maßgebend, daß der Einleitungsbereich nicht wesentlich von Randeinflüssen gestört werden soll. So wurde für den rückwärtigen Bereich der Verankerung mindestens $0,75 \times$ Scheibenbreite, für den vorderen Bereich mindestens $1,0 \times$ Scheibenbreite vorgesehen. Daraus ergab sich eine Länge von etwa 3,0 m.

2.1.2 Herstellung der Versuchskörper

Alle Versuchsstücke wurden im Institut hergestellt.

a) Bewehrung

Die Bewehrung der Betonscheiben ist in den Bildern 6 - 10 dargestellt.

Im oberen Teil der Scheiben, wo die Reaktionskräfte

der Prüfpressen eingeleitet wurden, ist in jedem Falle eine starke Spaltzugbewehrung eingelegt worden. Hingegen wurde eine Spaltzugbewehrung vor dem Ankerkopf nur bei den Versuchskörpern 3, 4 und 5 eingebaut. Auf eine Rückverankerung der Vorspannkraft wurde in allen Fällen verzichtet. In den übrigen Bereichen der Scheibe wurde ein großmaschiges Bewehrungsnetz eingelegt.

Diese Bewehrungsdetails sowie die Gesamtbewehrung von Scheibe Nr. 5 sind aus den Fotos 11 - 18 ersichtlich.

Die Materialeigenschaften der schlaffen Bewehrung und der Vorspannglieder wurden nicht weiter überprüft.

b) Beton

Die Zusammensetzung des verwendeten Frischbetons wurde in Eignungsprüfungen festgelegt. Dabei wurden Betoneigenschaften, die den Verhältnissen auf der Baustelle zum Zeitpunkt des Vorspannens entsprechen, angestrebt.

Die Kornzusammensetzung des Zuschlagstoffes zeigt Bild 19.

Der Zementanteil betrug 180 kg/m^3 Z 275, der Wasserzementfaktor $w/z = 0,97$.

Die Festigkeitseigenschaften des Betons wurden zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung und jeweils nach 28 Tagen an genormten Prüfkörpern bestimmt.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt Tafel III.

2.2 Meßeinrichtung

Die Betonspannungen an der Scheibenoberfläche wurden mit 6 cm langen Hottinger Dehnmessstreifen (Typenbezeichnung LP 21 60/120) durchgeführt. Die Anordnung der Dehnmessstreifen ist in den Bildern 20 bis 24 dargestellt. Besonderer Wert wurde auf eine mög-

lichst genaue Erfassung der Spannungsverteilung entlang der Längsachse (über dem Spannglied) gelegt. Deshalb wurden die Meßstellen im Bereich des Spannkopfes dicht nebeneinander angeordnet. Hinter dem Spannkopf wurde außerdem bei jedem Versuch entlang einer zur Mittelachse unter 30° geneigten Linie (etwäische Hauptzugrichtung) gemessen.

Da auch bei sorgfältiger Arbeit eine gewisse Exzentrizität des Spanngliedes nicht auszuschließen war, wurden auch einige Meßstellen auf der Rückwand des Versuchskörpers angeordnet. Diese Meßstellen sind in den Bildern 20 bis 24 durch Schraffur gekennzeichnet.

Für den Fall einer starken Rißbildung wurden Meßstellen für Setzdehnungsmesser vorbereitet. Messungen dieser Art brauchten jedoch nicht durchgeführt zu werden.

Im Bereich des Spannkopfes wurden in zwei Fällen im Scheibeninnern Messungen durchgeführt. Hierfür wurden Bewehrungsstähle mit aufgeklebten Dehnmeßstreifen einbetoniert. Die Anordnung dieser Meßstellen ist aus den Bildern 23 und 24 bzw. aus den Fotos 15 - 17 ersichtlich.

2.3 Belastungseinrichtung

Die Versuche wurden unter dem großen Prüfgerüst (MAN) des Instituts aufgebaut. Diesen Aufbau zeigt Bild 25 bzw. 27. Da die Versuche den Zustand Vorspannung simulierten, wobei die Spannglieder jedesmal bis zur Fließgrenze des Spannstahles beansprucht wurden, war das Hauptproblem die Gegenverankerung des Spanngliedes. Hierfür wurde eine Bügelkonstruktion für eine maximale Verankerungskraft von 150 t hergestellt. In diesem Bügel wurden die Dyckerhoff-Spannglieder durch die zum Ankerkopf gehörende Mutter, die BBRV-Glieder durch Verwendung einer zur Vorspannpresse gehörenden Gewindestange mit Mutter verankert. Diese Details sind aus den Bildern 26 und 28 zu ersehen.

Die Vorspannkraft wurde durch zwei parallel geschaltete 100 t-Pressen eingeleitet. Eine Schiefstellung des Versuchsstückes unter Last konnte durch nachträgliches Zentrieren jederzeit korrigiert werden.

Die aus Bild 27 ersichtliche Stahlkonstruktion an beiden Rändern des Versuchsstückes war lediglich aus Sicherheitsgründen zum Schutz des an der Versuchsausführung beteiligten Personals angeordnet.

2.4 Durchführung der Versuche

Die Versuche wurden im Betonalter von 12 - 18 Tagen durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist aus Bild 27 ersichtlich.

Nach dem Einbau der Prüfkörper wurden diese zunächst unterteilt, um eine Null-Ablesung der Dehnungsmeßstreifen ohne Eigengewicht zu ermöglichen. Als erste Laststufe wurde das Eigengewicht (2,5 - 3,0 Mp) der Scheibe aufgebracht. Die weiteren Laststufen betrugen jeweils 15 - 20 % der für das Spannungsglied zulässigen Last. Die Fließgrenze des Spannstahles wurde im allgemeinen in 10 Laststufen erreicht.

Die Ablesung der Meßstellen erfolgte 3 Minuten nach der Lasteintragung. Die Messungen während einer Laststufe wurden in der Regel in 20 Minuten abgeschlossen. Die Gesamtdauer eines Versuches betrug 3 - 4 Stunden.

In einigen Fällen wurde der Versuchsablauf durch Schiefstellung des Versuchskörpers infolge exzentrischer Lasteintragung gestört. Diese Störungen konnten jedoch durch Zentrierung der Pressen beseitigt werden. Nur im Versuch Nr. 4 mußte die Prüfung kurz vor dem Erreichen der Fließgrenze des Spannstahles beendet werden.

Nachfolgend wird über den Versuchsablauf jeder Scheibe im einzelnen berichtet (vgl. hierzu noch Tabelle I und II).

Versuch Nr. 1:

Dieser Versuch mit einer Verankerung System Dywidag \varnothing 26 diente in erster Linie zum Testen der Belastungs- und Meßeinrichtung. Dabei sollte eine eventuelle Rißbildung unbedingt verhindert werden. Deshalb wurde, abweichend von der Zulassung, eine Scheibendicke von 29 cm gewählt (vgl. Tabelle II). Der Versuch wurde bei einem Betonalter von 17 Tagen durchgeführt. Die zulässige Vorspannkraft wurde mit der 7. Laststufe erreicht; das Fließen des Spannstahles trat in der 10. Laststufe bei 45 Mp Pressenkraft (Gesamtlast $P=48,0$ Mp) ein. Risse konnten dabei nicht beobachtet werden.

Versuch Nr. 2:

Bei diesem Versuch wurde ein Dywidag-Spannglied (\varnothing 26) mit einer geringeren Scheibendicke als nach der Zulassung erforderlich geprüft, um eine Rißbildung zu erzielen. Dabei wurden Risse beobachtet, die bei der 6. Laststufe (25 Mp Pressenkraft) unmittelbar über dem Ankerkopf längs und quer zur Vorspannrichtung an beiden Scheibenseiten auftraten.

Die Länge des Risses betrug zunächst 5 - 6 cm ($<$ Durchmesser des Ankerkörpers), verlängerte sich jedoch bis zur 10. Laststufe auf rd. 20 cm. Die Rißbreite war stets größer als 0,2 mm; an der Fließgrenze des Spannstahls (10. Laststufe, Pressenkraft 45 Mp, Gesamtlast $P=47,5$ Mp) erreichte sie etwa 0,5 mm. Die Rißbilder an Vorder- und Rückseite sind aus den Fotos 29 und 30 ersichtlich.

Versuch Nr. 3

Bei diesem Versuch wurde eine BBRV-Fächerverankerung untersucht. Wegen der Größe des Ankerkörpers wurde dabei die Scheibenlänge auf 400 cm vergrößert.

Das Fließen des Spannstahles trat bei der 10. Laststufe ein (Gesamtlast 88 Mp), die zulässige Vorspannkraft ($V=60$ Mp) wurde mit der 7. Laststufe erreicht.

Der einzige, beiderseits sichtbare Riß trat bei der 5. Laststufe (Pressenkraft 40 Mp) unmittelbar über der Ankerplatte quer zur Vorspannrichtung auf. Die Rißlänge betrug 10-12 cm ($<$ Breite der Ankerplatte = 20 cm), die Rißbreite 0,01 mm. Dieser Riß wurde bei jeder weiteren Laststufe beiderseits 3 - 4 cm länger, so daß gegen Ende des Versuchs ein 50 cm langer, kreissegmentförmiger Riß vorhanden war. Die Rißbreite ist dabei auf 0,1 mm angewachsen.

Die Rißbilder der Vorder- und Rückseite zeigen die Fotos 31 und 32.

Versuch Nr. 4:

Dieser Versuch mit einer BBRV-Verankerung wurde nach 9 Laststufen kurz vor dem Erreichen der Fließgrenze des Spannstahles wegen Schiefstellung des Versuchskörpers abgebrochen. Die zulässige Vorspannkraft wurde mit der 7. Laststufe (Pressenkraft 60 Mp) erreicht. Der erste Riß trat bei der 4. - 5. Laststufe quer zur Vorspannrichtung, beiderseits über der Ankerplatte des Ankerkörpers (vgl. Bild 4) mit 10 cm Länge und 0,1 mm Rißbreite auf. Bei der 6. Laststufe bildete sich nur an einer Seite der Scheibe ein 10 cm langer Spaltzugriß aus, dessen Länge während des Versuchsablaufes auf 20 cm anwuchs; die Rißbreite ist jedoch bis zum Versuchsende unter 0,1 mm geblieben. Der zuerst aufgetretene Riß über dem Spannkopf verlängerte und erweiterte sich in jeder Laststufe, so daß nach Abschluß des Versuches ein 45 - 50 cm langer und 0,2 mm breiter Riß entstanden war. Der Riß verlief bis zum Ende des Versuches senkrecht zur Vorspannrichtung.

Der Versuchskörper ist aus den Fotos 33 und 34 zu erkennen.

Versuch Nr. 5:

Der Versuchskörper Nr. 5 wurde durch zwei am Rande der Scheibe geführte Dywidag-Vorspannglieder (vgl. Bild 10 und 17) unmittelbar vor Beginn des Versuches zentrisch ($\sigma \approx 20 \text{ kg/cm}^2$) vorgespannt.

Die Fließgrenze des in der Scheibe verankerten Spannstahles wurde in 10 Laststufen erreicht. Es haben sich keine Risse gezeigt, da die Längsspannungen während des ganzen Versuches ablaufes im Druckbereich verblieben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei den bisher durchgeführten Versuchen keine Rißbildung im rückwärtigen Bereich des Ankerkopfes beobachtet werden konnte. Hingegen traten in 3 Fällen Risse direkt über dem Ankerkörper auf, die mit keiner Verankerungsbewehrung hinter dem Ankerkörper hätten vermindert werden können, da sie auf örtliche Spannungsspitzen an der Berandung des Ankerkörpers zurückzuführen sind. Hierfür wurden an den Versuchskörpern 4 und 5 Messungen im Innern der Scheibe durchgeführt, deren Ergebnisse gemeinsam mit den anderen Meßergebnissen unter Pkt. 3 wiedergegeben werden.

5. Auswertung der Meßergebnisse

Aus den gemessenen Betondehnungen wurden die Spannungen mit dem an Prüfkörpern von 15 x 15 x 60 cm ermittelten E-Modul (vgl. Tafel III) berechnet. Diese E-Modul-Werte gelten als Sekantenmodul für Spannungen bis etwa 40 - 60 kg/cm², da sie unter einer 10-maligen Schwellbelastung mit der 0,1-fachen Prismenfestigkeit bestimmt wurden. Für Dehnungen $\epsilon > 0,2\%$ wurden die Spannungen der jeweils gemessenen Beton-Arbeitslinie entnommen.

Die wichtigsten Meßergebnisse sind in den Bildern 35 - 48 dargestellt. Besonderer Wert wurde dabei jeweils auf die Wiedergabe des Spannungsverlaufes entlang der Längsachse der Versuchsscheiben gelegt. Für jede Scheibe wurden die Spannungsverteilungen bei mehreren Laststufen dargestellt, um Spannungsumlagerungen mit fortschreitender Belastung aufzuzeigen. Aus diesem Grunde wurden auch bei jedem Versuch an Stellen mit maximaler Zug- und Druckbeanspruchung die Spannungen in Abhängigkeit von der Belastung (Ankerkraft) gesondert dargestellt (vgl. Bilder 40 - 44).

Wie bereits erwähnt, wurden bei Versuch Nr. 4 und 5 Messungen auch im Scheibeninnern in unmittelbarer Nähe des Spannkopfes durchgeführt (vgl. Bilder 15, 16 und 18 sowie 23 und 24), um Aufschlüsse über den dort herrschenden räumlichen Spannungszustand zu bekommen. Diese Spannungsverteilungen über die Scheibendicke hinweg sind in den Bildern 47 und 48 dargestellt.

Die wesentlichsten Ergebnisse lassen sich im einzelnen wie folgt zusammenfassen:

- a. Die maximal auftretenden Zugspannungen hinter dem Ankerkörper betragen in jedem Falle nur einen Bruchteil der vor dem Ankerkopf herrschenden Druckspannungen. So konnten z.B. im Versuch Nr. 5 die Zugspannungen bereits mit einer zentrischen Vorspannung von $\sigma_v = 21,0 \text{ kg/cm}^2$ voll überdrückt werden.
- b. Aus den Bildern 40 - 44 ist ersichtlich, daß die Zugspannungen nicht linear mit der Ankerkraft anstiegen. Diese Erscheinung ist besonders deutlich bei den Versuchskörpern Nr. 2, 3 und 4 zu beobachten, bei denen während des Versuchs senkrecht zur Vorspannungsrichtung im Bereich des Ankerkörpers Risse auftraten. Nach dem Auftreten dieser Risse konnte offensichtlich kein nennenswerter Anteil der Ankerkraft mehr nach rückwärts übertragen werden. Die verbliebenen Längszugspannungen resultieren wahrscheinlich aus der inneren Zwängung der Gesamtscheibe.

Der Haftverbund zwischen Ankerkörper und umgebendem Beton wurde auch bei Versuchskörpern ohne Ribbildung an den Oberflächen beeinträchtigt. Auch hier wuchsen nämlich die Zugspannungen hinter dem Ankerkörper langsamer als die Ankerkraft an.

- c. Die Ursache für eine Ribbildung bzw. für eine Zerstörung des Betongefüges um den Ankerkopf herum ist aus den Spannungsverteilungen über die Scheibendicke unmittelbar hinter dem Ankerkörper zu erkennen. Eine schematische Darstellung des dort herrschenden Spannungszustandes ist in Bild 46 wiedergegeben. Es zeigt eine Spannungsverteilung über die Scheibendicke, wie sie sich bei einer Zerlegung des tatsächlichen räumlichen Spannungszustandes in zwei ebene Probleme näherungsweise ergibt. Diese

Vorstellung wird durch die Versuche hinreichend bestätigt. So ist z.B. die Versuchsscheibe Nr. 4 bei relativ niederen Zugspannungen an den Oberflächen gerissen, weil im Scheibeninneren beträchtlich höhere Zugspannungen auftraten. Im Versuch Nr. 5, bei dem keine sichtbaren Risse entstanden sind, waren die Bereiche an beiden Oberflächen der Scheibe stark überdrückt, so daß evtl. Anrisse im Innern nicht bis an die Oberfläche vordringen konnten. Die unstetige Zunahme der maximalen Zugspannungen hinter dem Ankerkopf läßt jedoch auch hier innere Zerstörungen vermuten (vgl. Bild 44).

- d. Diese Überlegungen werden durch die Bilder 40 - 44 bestätigt, die u.a. den Verlauf der maximalen Druckspannungen vor dem Ankerkopf in Abhängigkeit von der eingeleiteten Ankerkraft zeigen. Betrachtet man z.B. den Verlauf bei Scheibe Nr. 2 (Bild 41) vor und nach der Rißbildung, so sieht man, daß nach der Rißbildung eine immer schnellere Zunahme der Druckspannungen erfolgte. In diesem Zustand mußte nämlich die gesamte Ankerkraft ausschließlich durch Druckspannungen übertragen werden. Betrachtet man hingegen die nicht gerissene Scheibe Nr. 5, so kann man keinen ausgeprägten Knick im Verlauf der Kurve feststellen. Die Druckspannungen wuchsen jedoch auch hier schneller als die Ankerkraft an, was auf eine langsame Erschöpfung der Haftung hinweist.
- e. Mit fortschreitender Belastung bildete sich unmittelbar hinter dem Spannkopf ein Druckbereich aus (vgl. z.B. Bild 42). Dieser resultiert aus der inneren Zwängung der Gesamtscheibe und läßt sich, wie später gezeigt wird, rechnerisch nachweisen.
- f. Der starke Abfall in den Druckspannungen nach Bild 35 - 39 resultiert aus einem plötzlich aufgetretenen Spaltzugriß im Bereich dieser Meßstreifen. Ihm kommt keine weitere Bedeutung zu.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die aus Einzelspanngliedern resultierenden "Scheiben-Zugspannungen" im rückwärtigen

Bereich des Ankerkörpers keine Risse erzeugen. Risse unmittelbar hinter dem Ankerkopf werden durch den dort herrschenden räumlichen Spannungszustand mit hohen Zugspannungsspitzen verursacht. Hierbei ist die Ausbildung des Spannkopfes von entscheidender Bedeutung. Von großem Einfluß ist außerdem das Verhältnis Kopfdurchmesser zu Scheibendicke, wie die Versuche, bei denen Risse auftraten, zeigen.

Literaturverzeichnis

- [1] El-Behairy, B.Sc.Sh.: Der Spannungszustand von Rechteckscheiben mit im Inneren angreifenden Einzelkräften, Dissertation TH Karlsruhe, 1966
- [2] El-Behairy, B.Sc.Sh.: Zugkräfte in der Nähe der Ankerplatten eines im Inneren einer Rechteckscheibe verankerten Spannglieds, Beton und Stahlbetonbau, Heft 6, 1968
- [3] El-Behairy, B.Sc.Sh.: Spannungszustand wandartiger Träger mit im Inneren angreifenden Einzelkräften, Beton- u. Stahlbetonbau 1968, Heft 10
- [4] Girkmann, K.: Flächentragwerke, 5. Auflage, Springer-Verlag Wien 1959
- [5] Müller, R.K. -
Schmidt, D.W.: Zugkräfte in einer Scheibe, die durch eine zentrische Einzellast in einer rechteckigen Öffnung belastet wird, Die Bautechnik, 1964, Heft 5
- [6] Muskhelishvili, N.I.: Some basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, P. Noordhoff Ltd., Groningen-The Netherlands, 1963

A N H A N G

Tabelle I

Versuchs- körper Nr.	Vorspann- system	Stahl- sorte	Art des Spanngliedes	V _{zul}	Art des Ankerkop- fes
1	Dykerhoff	St 80/105	Ø 26	30,7	B
2	"	St 80/105	Ø 26	30,7	B
3	BBRV	St 150/170	Bündel II 22 Ø 6	58,2	S _Q 56
4	BBRV	St 150/170	Bündel II 22 Ø 6	58,2	F 58
5	Dykerhoff	St 80/105	Ø 26	30,7	B

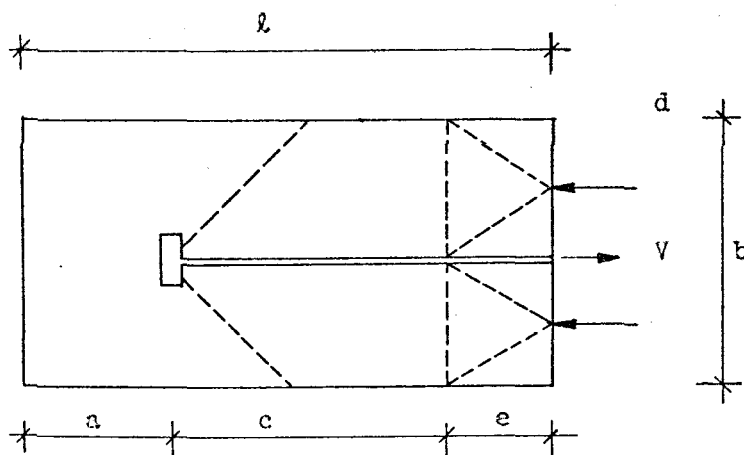


Tabelle II

Versuchs- körper Nr.	a	c	e	l	b	d	Randabstand nach Zul.
	[cm]						
1	100	160	70	330	135	29	12
2	100	160	70	330		18	12
3	130	200	70	400		26	13
4	105	125	70	300		26	13
5	135	115	60	310		24	12

Tabelle III

Versuchskörper	betoniert am	Versuchsalter	Würfelfestigkeit kg/cm ²		Prismen- festigkeit	Biegezug- festigkeit	Spaltzug- festigkeit	E-Modul
	geprüft am		Versuchstag	28 Tg.	am Versuchstag kp/cm ²			
Nr. 1	27.5.1968	17	189 ***	275	203 *	41,2 *	21,1 *	285.000 **
	13.6.1968							
Nr. 2	3.7.1968	12	199 ***	247	133 *	39,5	16,5	251.000 *
	15.7.1968							
Nr. 3	5.8.1968	16	-	239	186	40,3	21,9	294.000
	21.8.1968							
Nr. 4	10.10.1968	18	268	268	197,0	26,5	21,3	276.000
	28.10.1968							
Nr. 5	23.10.1968	12	232	278	158	33,1	20,1	270.000
	4.11.1968							

* 1 Tag nach dem Versuch;

** 22 Tage;

*** 8 Tage

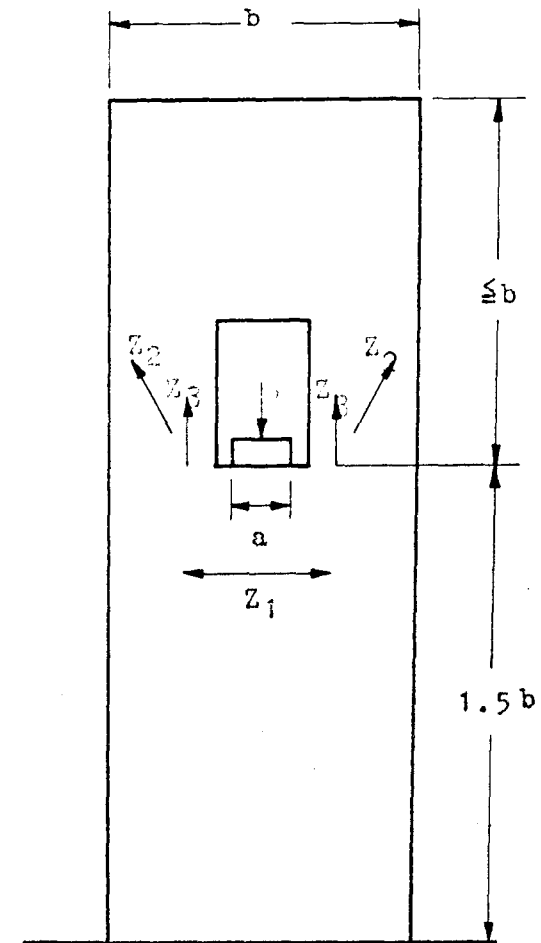
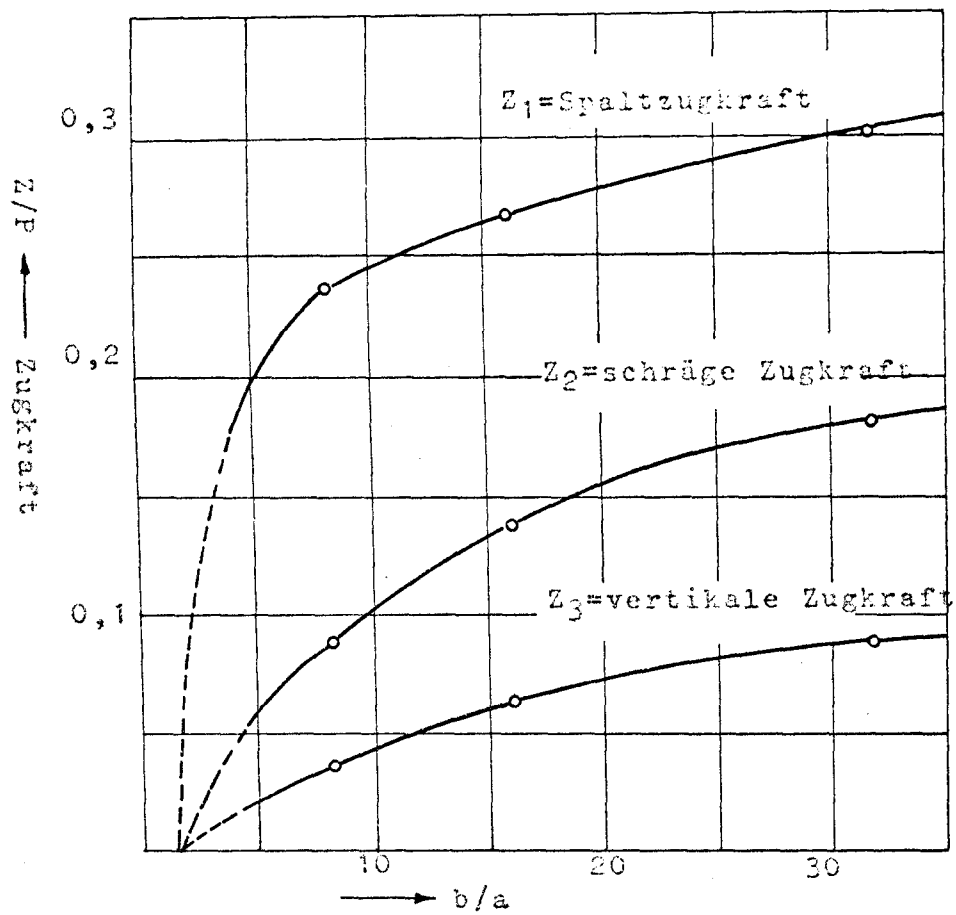
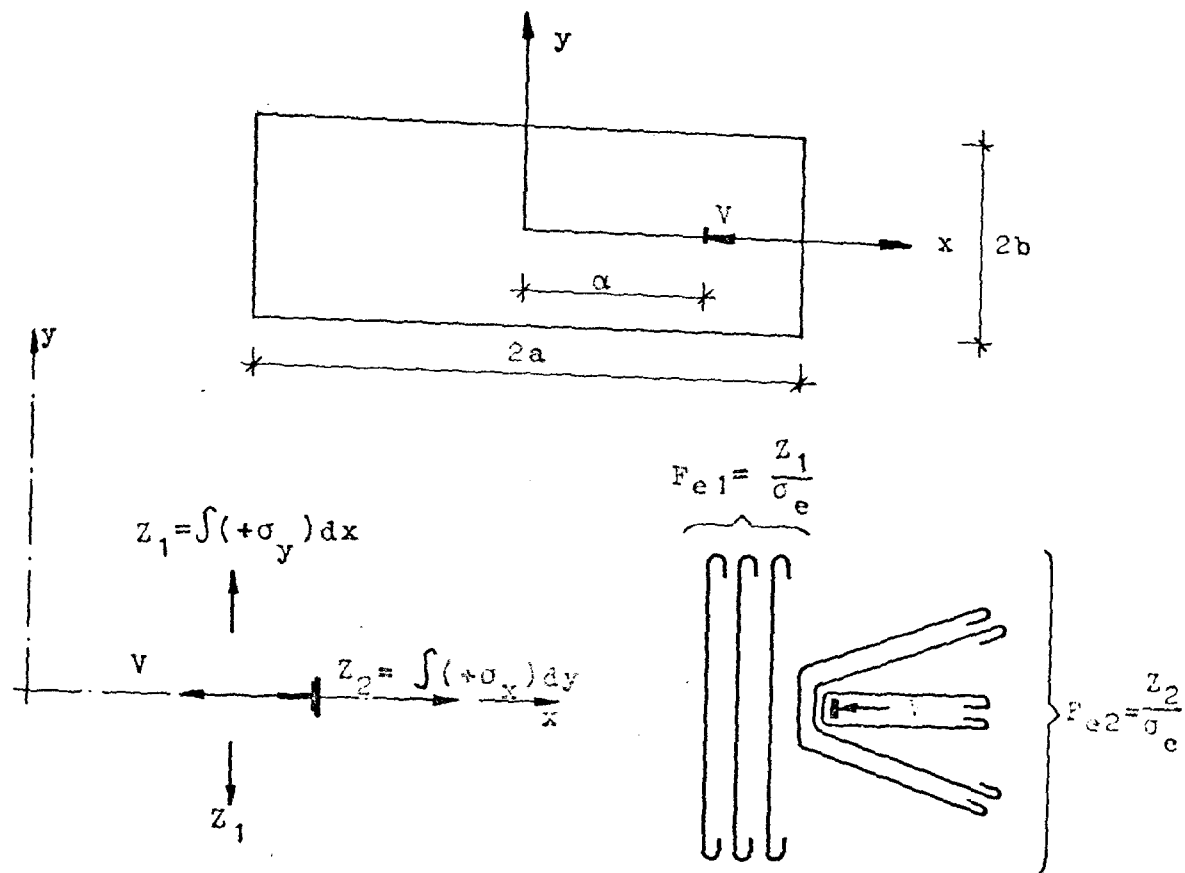


Bild 1

Spannungsoptische Meßergebnisse nach [5]



b/a	$\eta = \frac{a}{a}$	x/a	z/V	$\Sigma z/V$
1:2	0,25	0,1	0,23	0,52
		0,2	0,14	
		0,3	0,09	
		0,4	0,06	
	0,50	0,1	0,23	0,42
		0,2	0,13	
		0,3	0,06	
	0,75	0,1	0,16	0,21
		0,2	0,05	
		0,3	0,02	
1:4	0,25	0,1	0,15	0,23
		0,2	0,06	
		0,3	0,02	
	0,50	0,1	0,16	0,24
		0,2	0,06	
		0,3	0,02	
	0,75	0,05	0,22	0,42
		0,1	0,13	
		0,15	0,07	
		0,2	0,02	

Bild 2
Zugkräfte (Z_2) hinter der Verankerung nach [1]

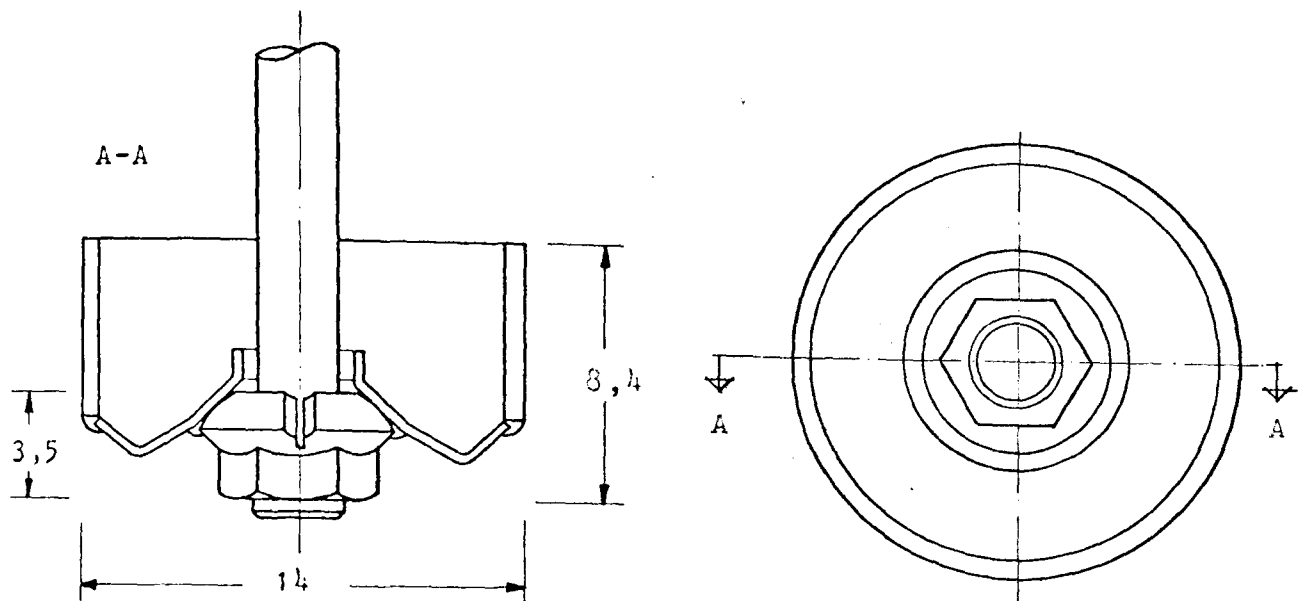


Bild 3

Verankerung B des Dywidag-Spannverfahrens

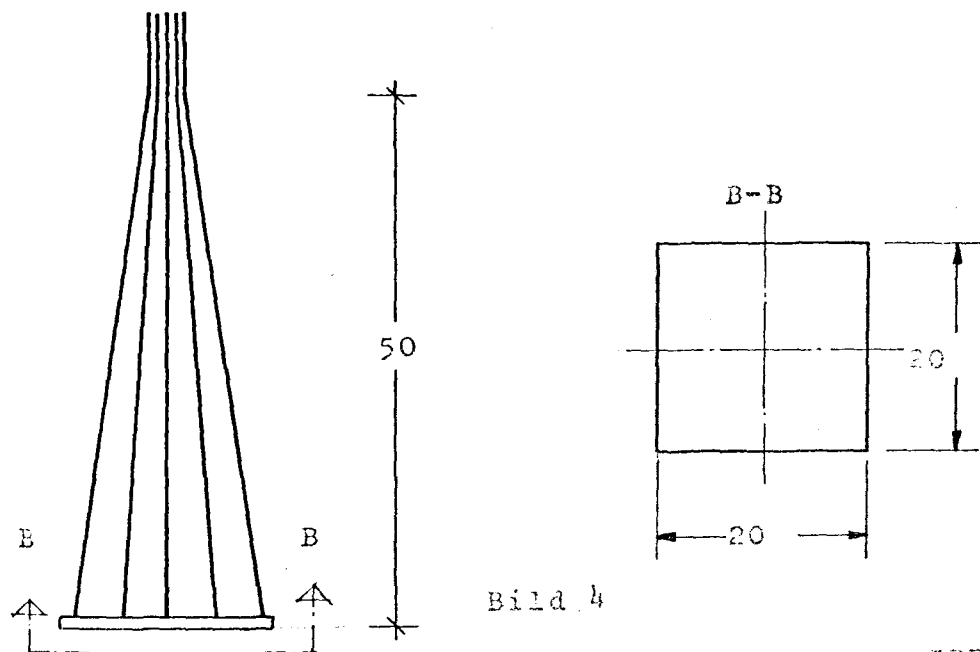


Bild 4

Verankerung S_Q 58 ; Vorspannsystem BBRV

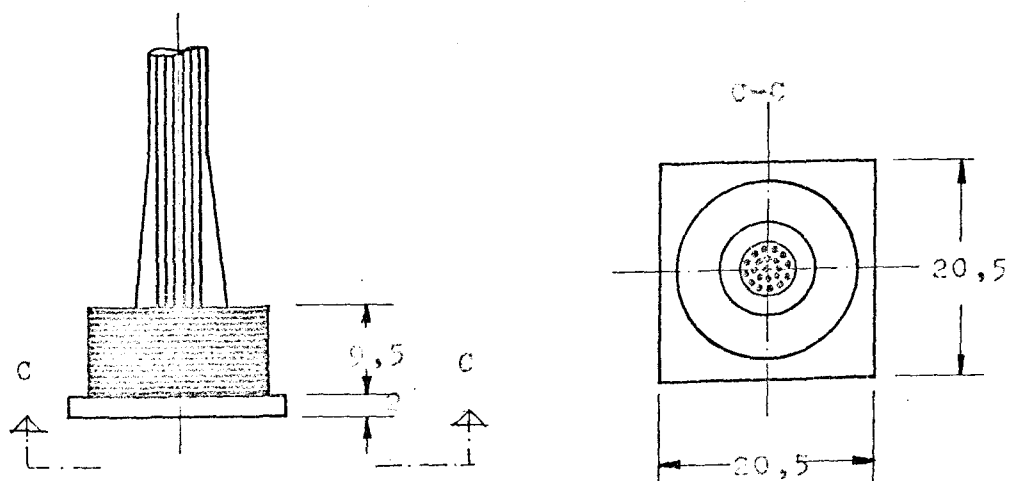
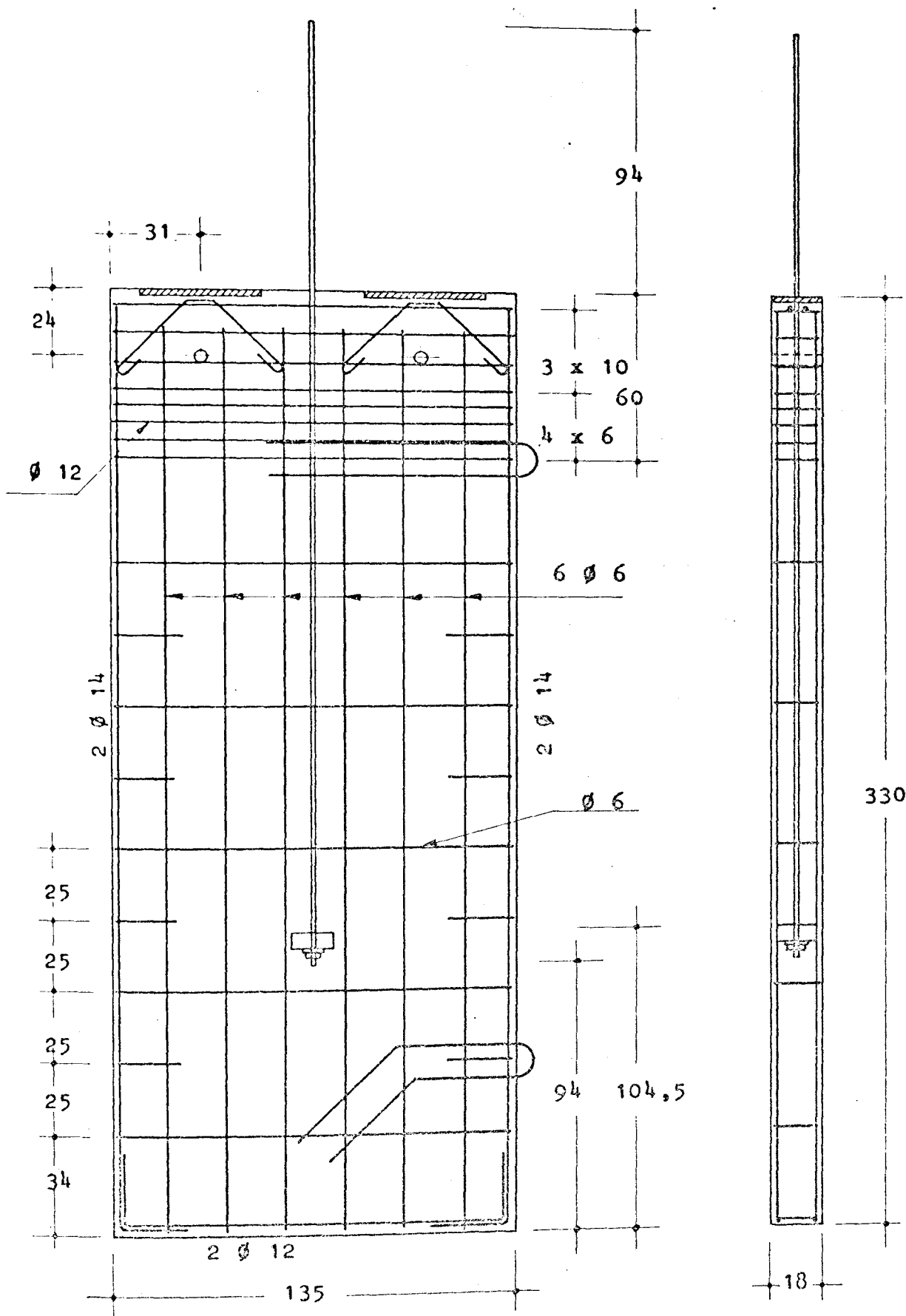


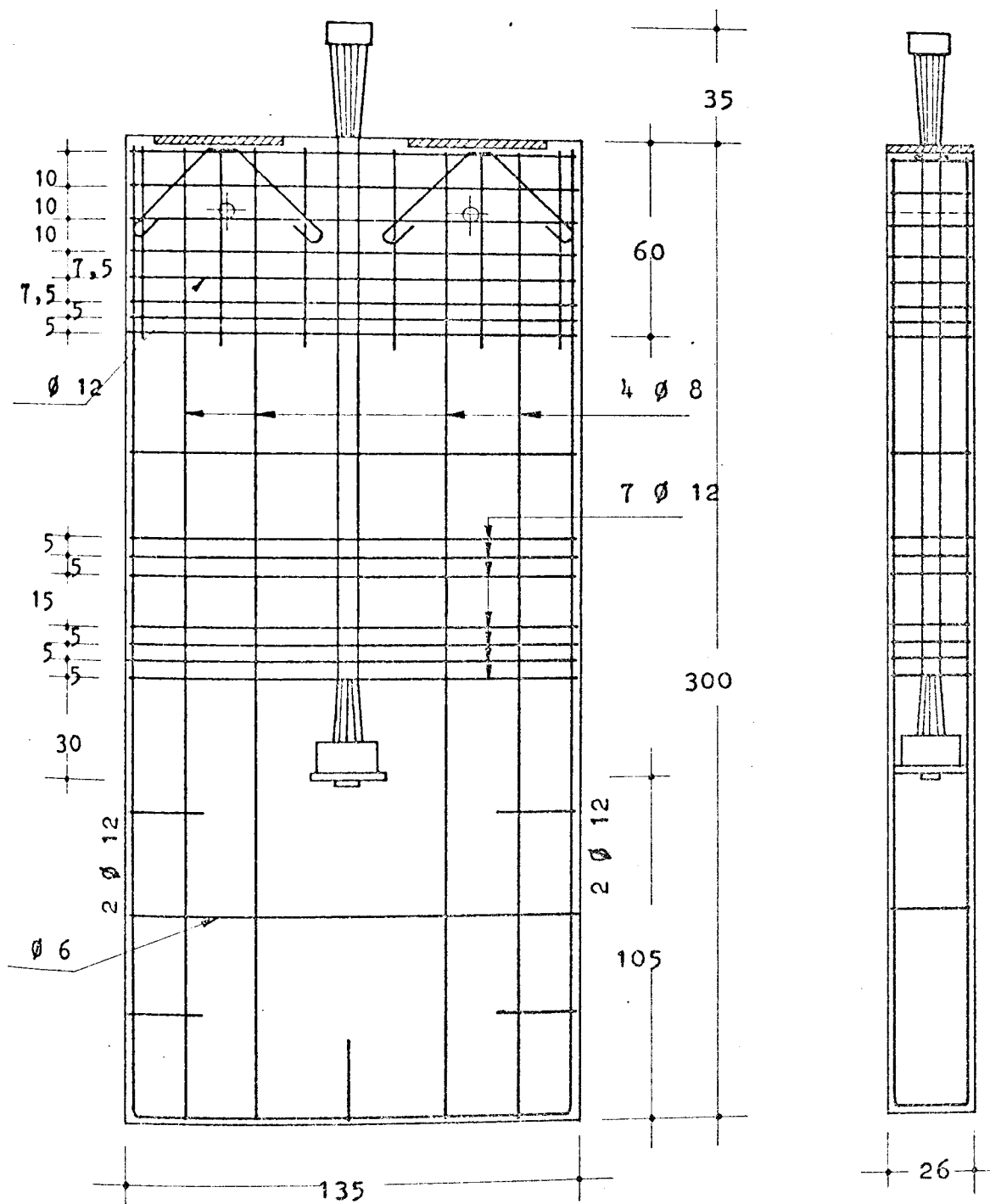
Bild 5

Verankerung F 58 ; Vorspannsystem BBRV



VERSUCHSKÖRPER NR. 2

Bild 7



VERSUCHSKÖRPER NR. 4

Bild 9

Durchgang in Gew.-% der einzelnen Körnungen

		0,2	1	3	7	15	30
Körnung I	0/3	3,7	76,7	99,8	100	100	100
Körnung II	3/7	0,5	6,8	8,9	93	100	100
Körnung III	7/15	0,2	0,4	0,7	3,6	87,5	100
Körnung IV	15/30	0,4	0,8	0,9	1,1	6,4	95,5

Durchgang in Gew.-% des Gemisches

Körng.	kp	%	0,2	1	3	7	15	30
0/3	188,8	32,1	1,2	24,6	32,1	32,1	32,1	32,1
3/7	129,3	22,0	0,1	1,5	2,0	20,4	22,0	22,0
7/15	99,4	16,9	-	0,1	0,1	0,6	14,8	16,9
15/30	171,0	29,0	0,1	0,2	0,3	0,3	1,9	27,7
	588,5	100	1,4	26,4	34,2	53,6	71,1	98,7

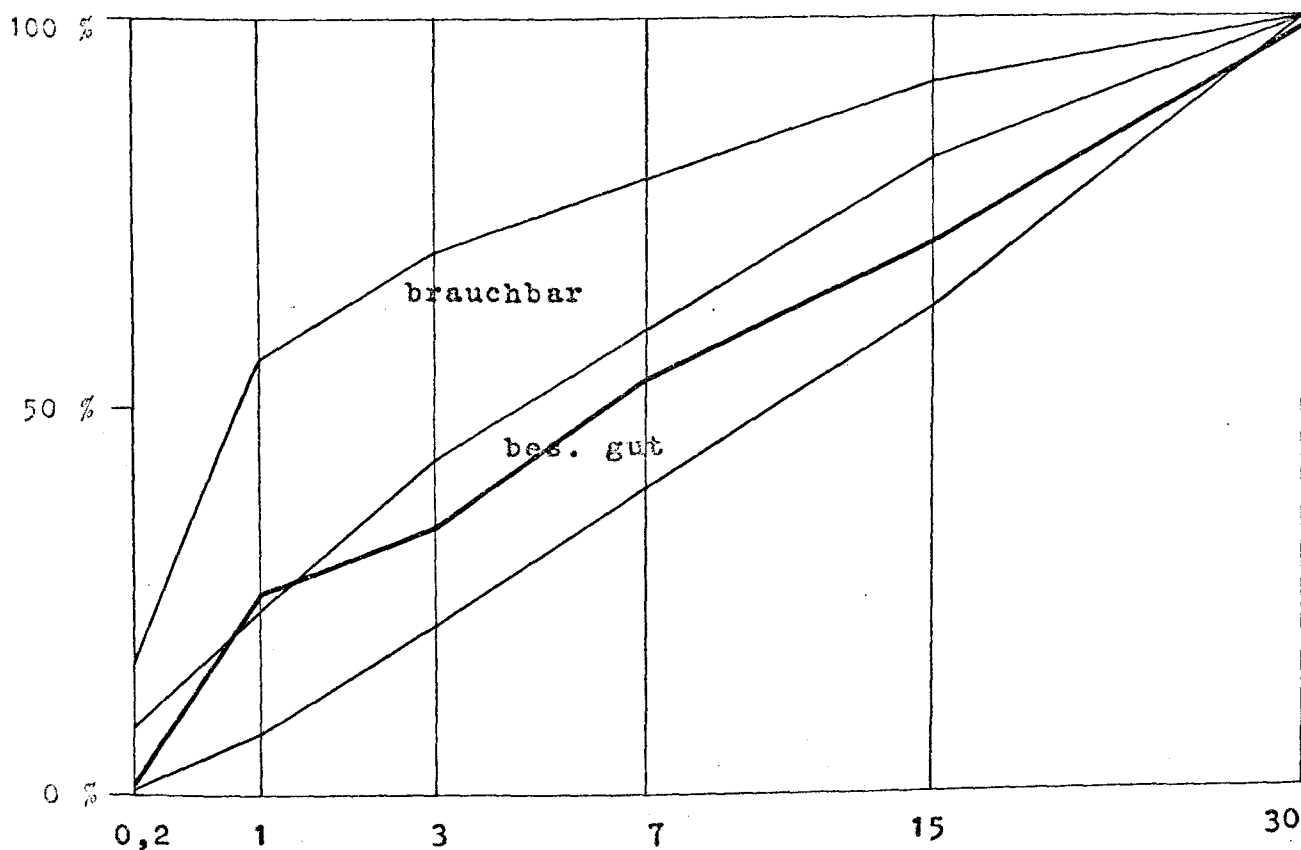


Bild 19a

Sieblinie des Zuschlagstoffes bei Versuch Nr. 1, 2 und 3

Durchgang in Gew.-% der einzelnen Körnungen

		0,2	1	3	7	15	30
Körnung I	0/1	13,4	93,9	99,9	100	100	100
Körnung II	0/3	1,4	55,5	93,2	100	100	100
Körnung III	3/7	0,3	6,7	8,2	94	100	100
Körnung IV	7/15	0,2	0,5	1,4	11,5	94,8	100
Körnung V	15/30	0,1	0,2	0,2	0,3	2,1	75,0

Durchgang in Gew.-% des Gemisches

Körng.	kp	%	0,2	1	3	7	15	30
0/1	47,2	8,0	1,1	7,5	8,0	8,0	8,0	8,0
0/3	141,6	24,1	0,3	13,4	22,4	24,1	24,1	24,1
3/7	129,3	22,0	-	1,5	1,8	20,7	22,0	22,0
7/15	99,4	16,9	-	0,1	0,2	1,9	16,0	16,9
15/30	171,0	29,0	-	0,1	0,1	0,1	0,6	21,6
	588,5	100	1,4	22,6	32,5	54,8	70,7	92,8

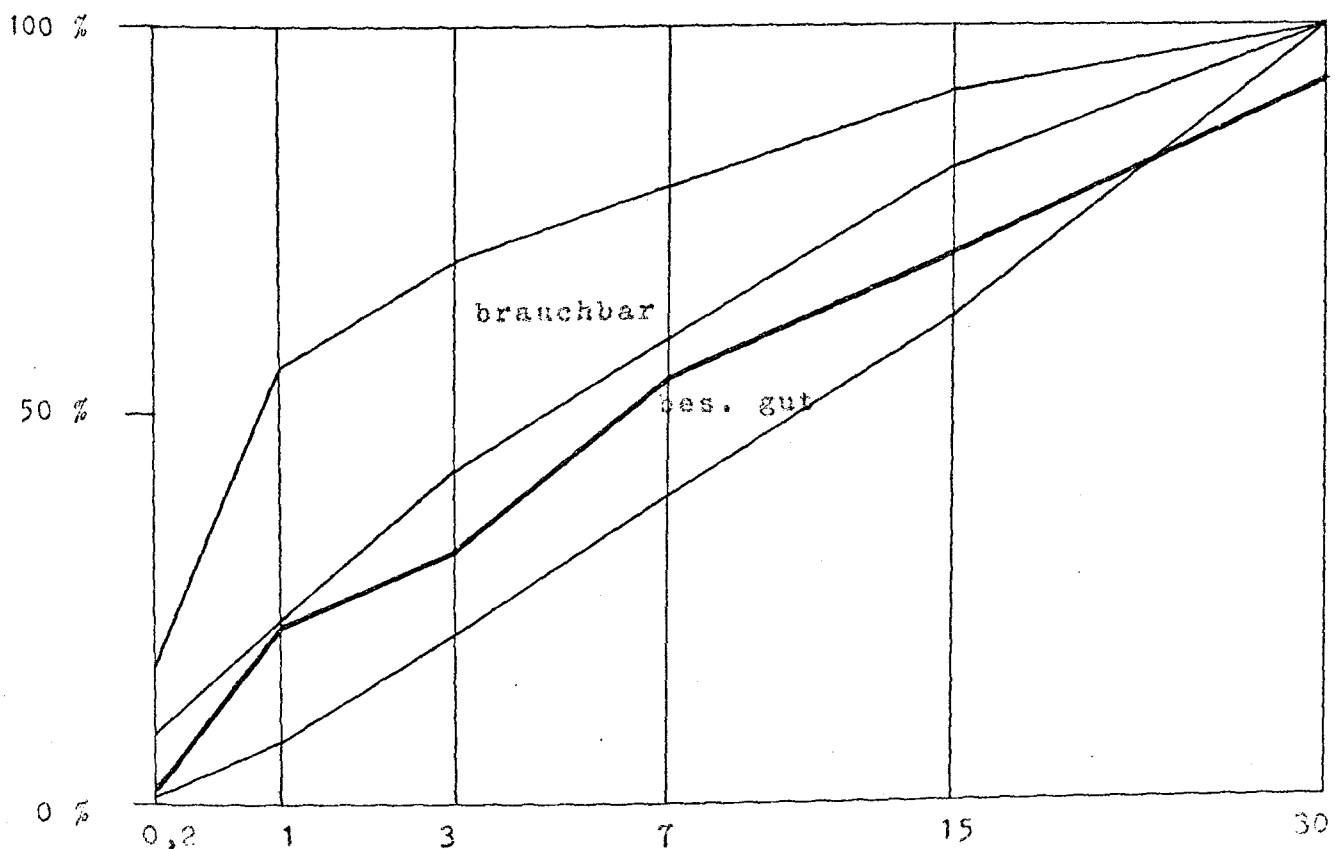


Bild 19b

Sieblinie des Zuschlagstoffes bei Versuch Nr. 4 und 5

ANORDNUNG DER DMS-MESSSTELLEN VERSUCHSKÖRPER NR. 1

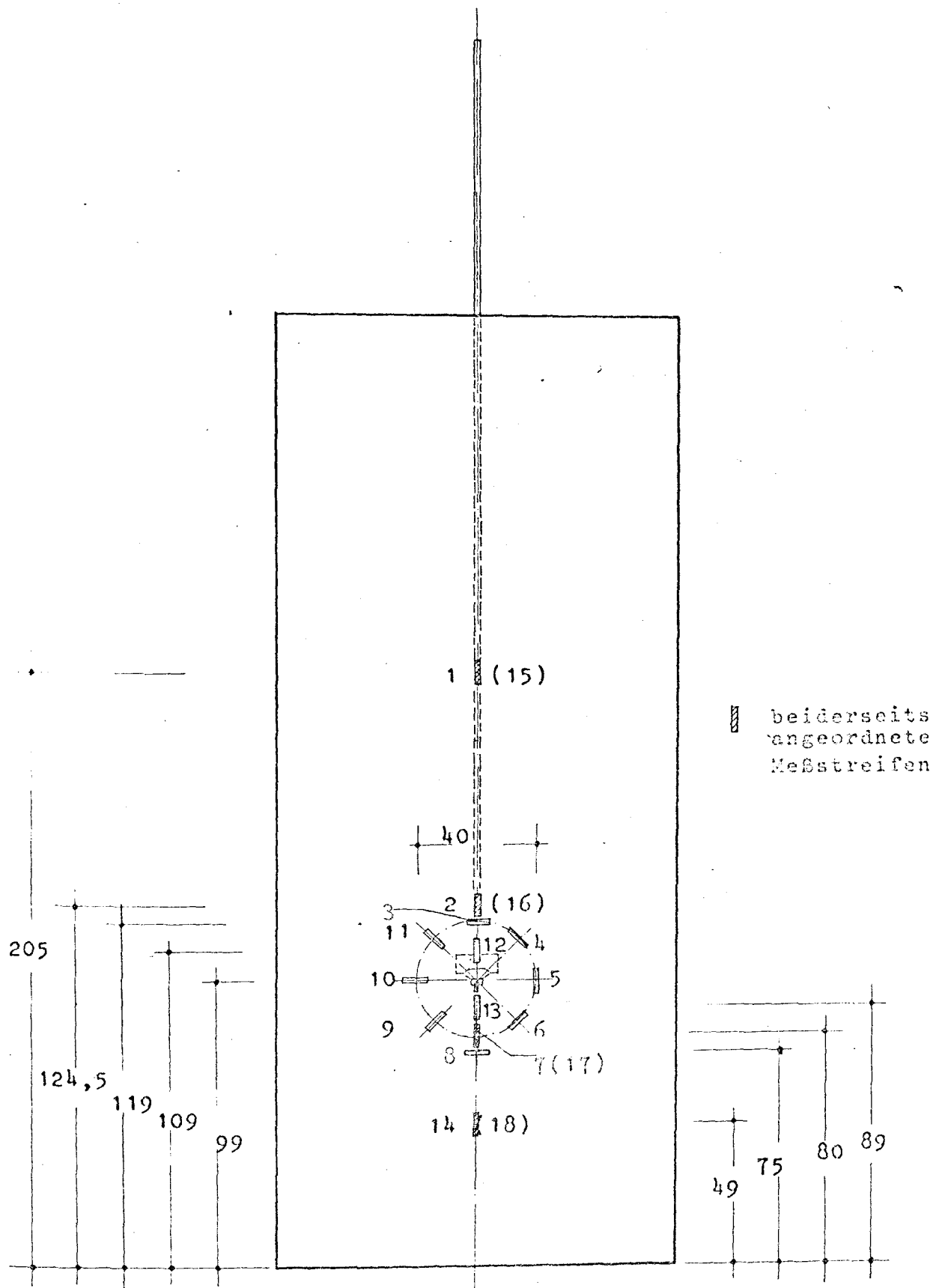
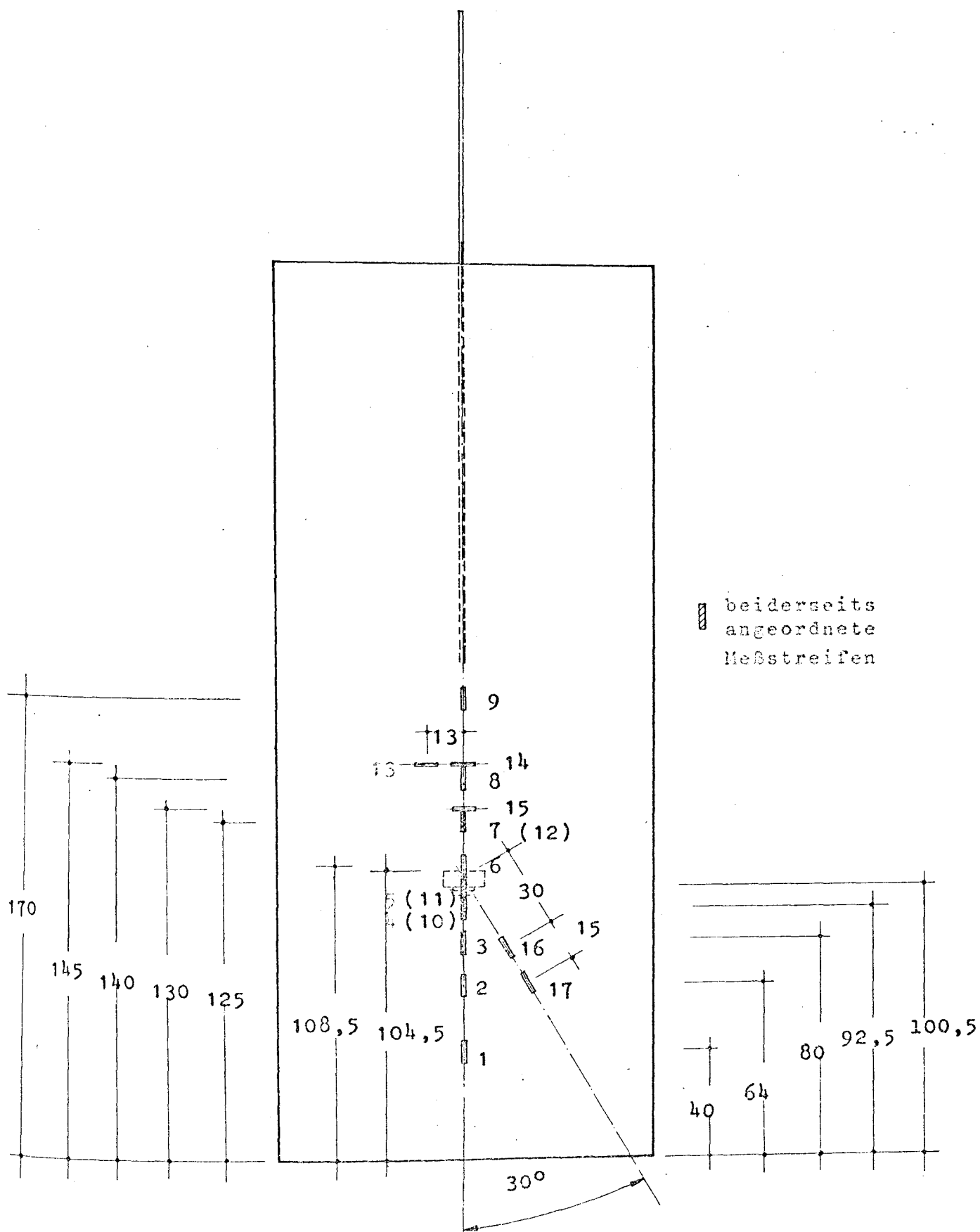


Bild 20



ANORDNUNG DER DMS-MESSSTELLEN
VERSUCHSKÖRPER NR. 2

Bild 21

ANORDNUNG DER DMS-MESSSTELLEN VERSUCHSKÖRPER NR. 3

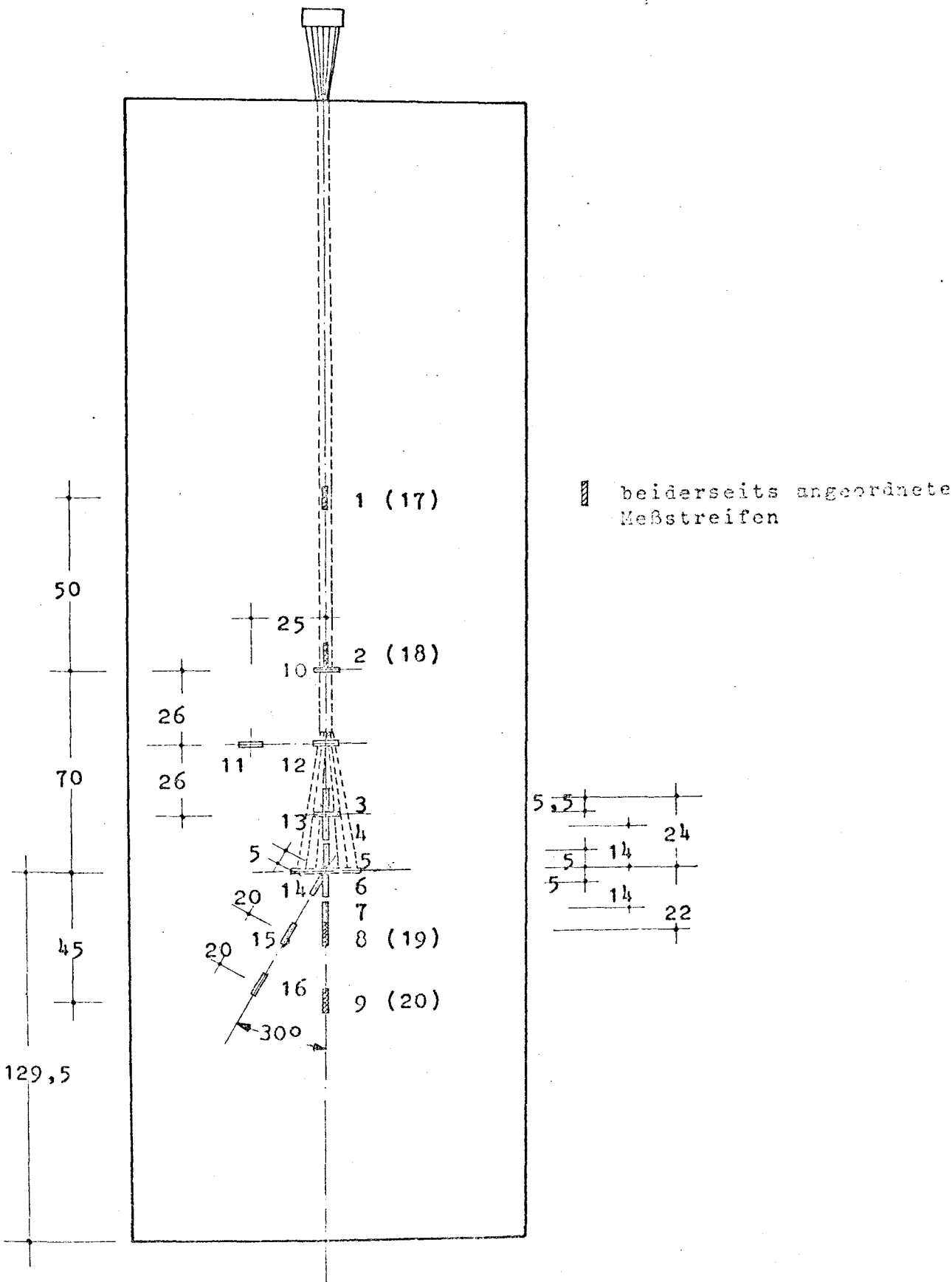
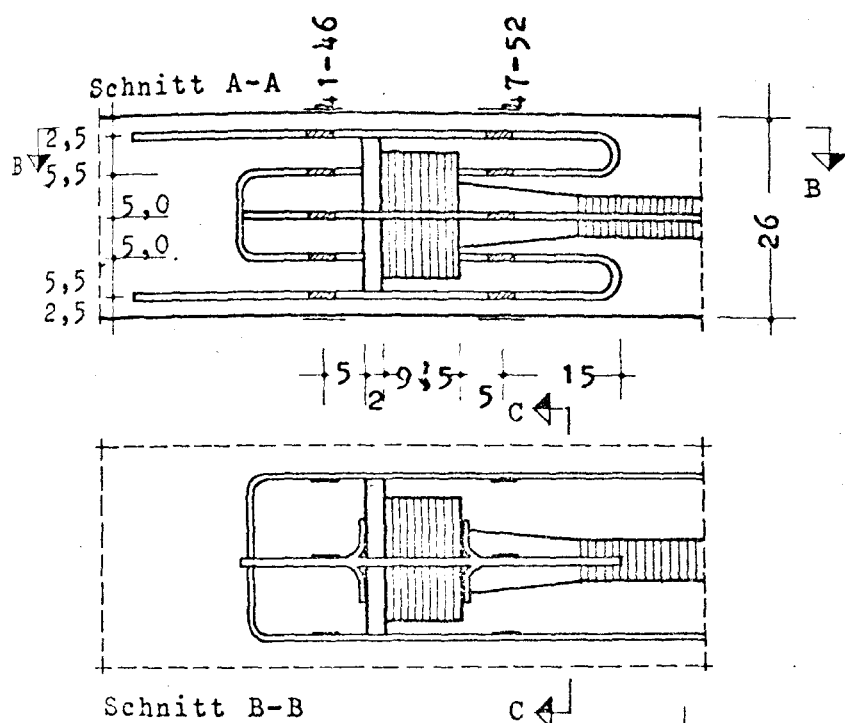
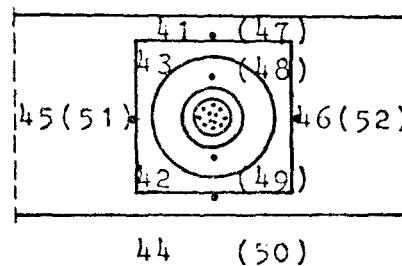


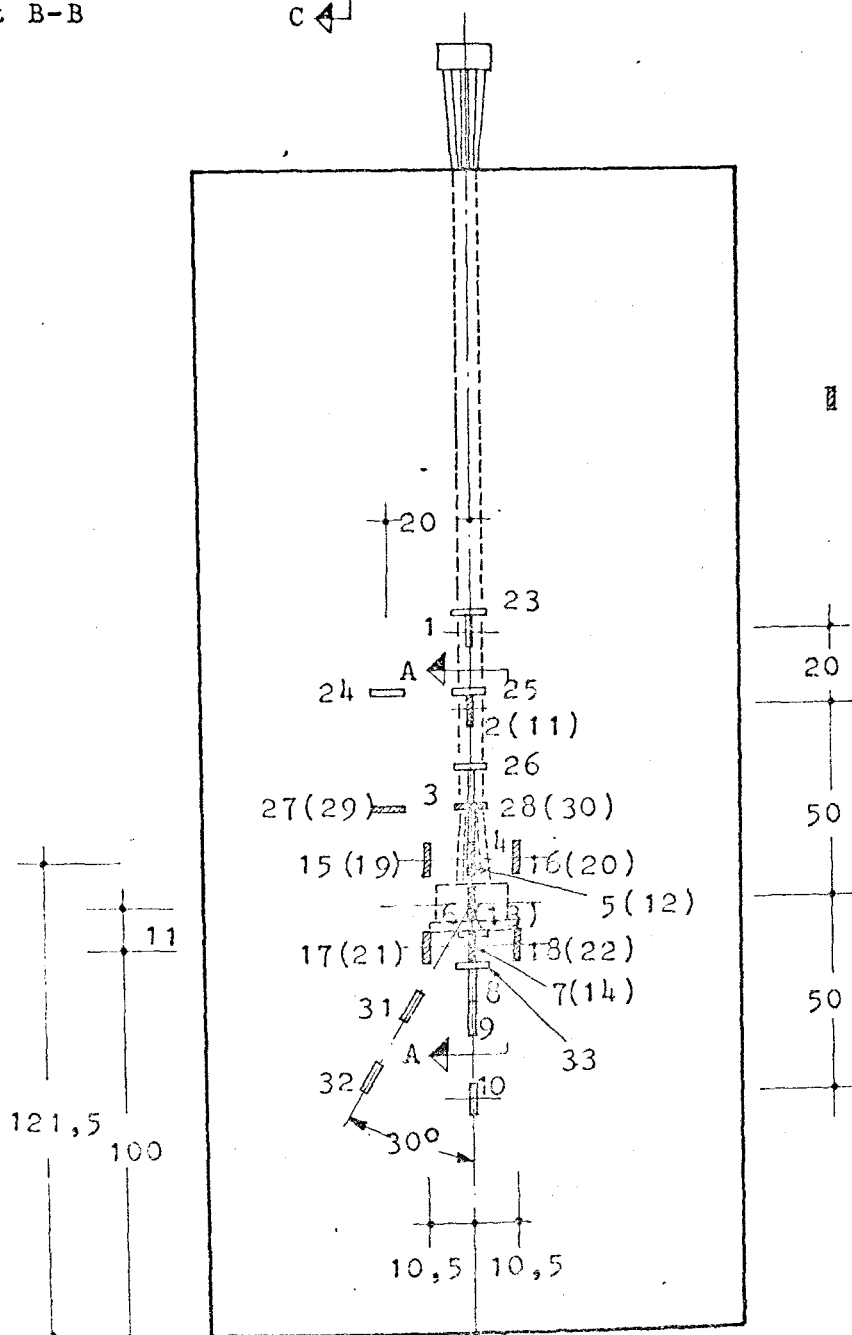
Bild 22



Schnitt C-C

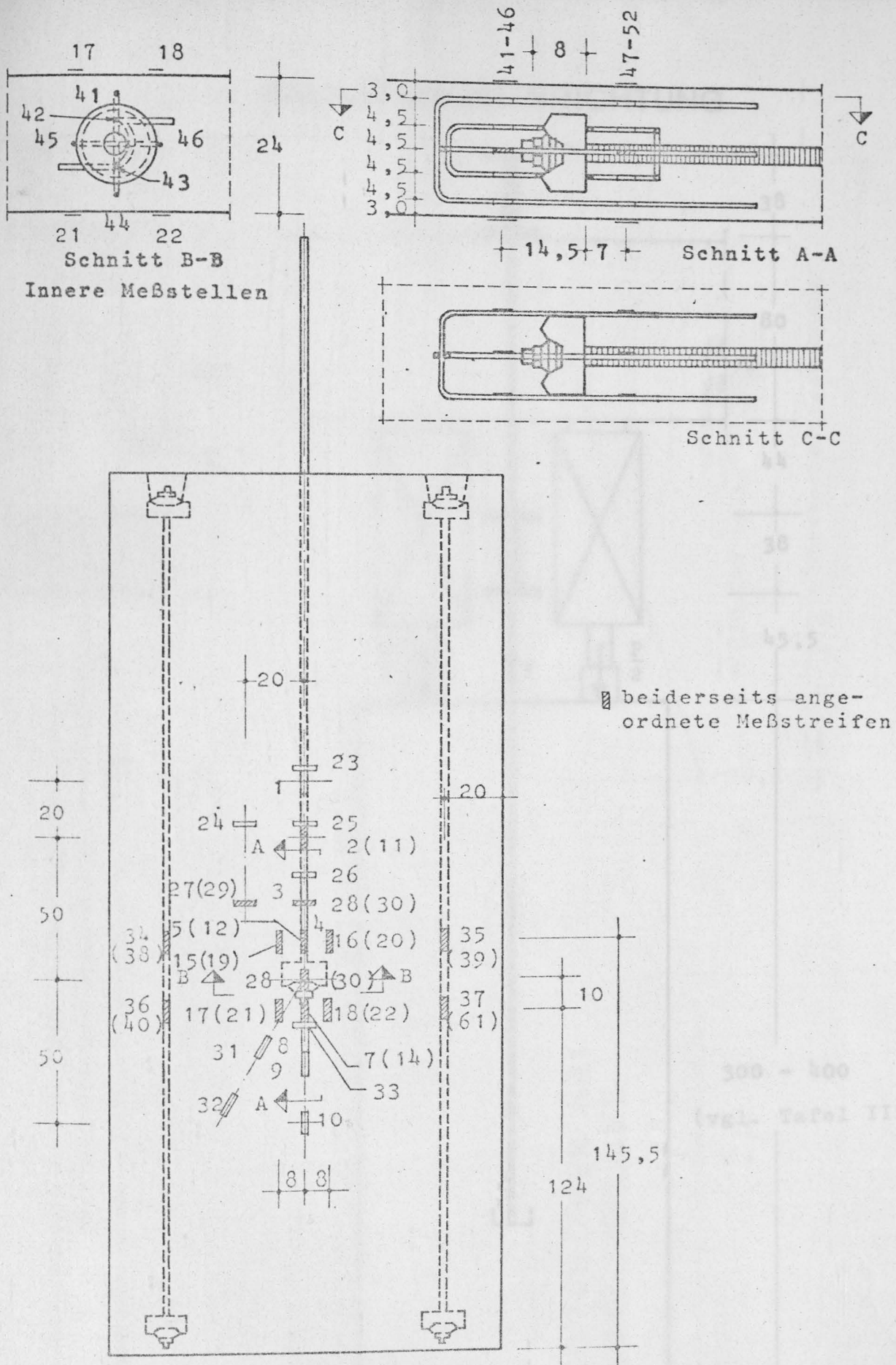


innere Meßstellen
 in (): vor dem Kopf



beiderseits angeordnete Meßstreifen

ANORDNUNG DER DMS-MESSSTELLEN
 VERSUCHSKÖRPER NR.4



ANORDNUNG DER DMS-MESSSTELLEN
VERSUCHSKÖRPER NR.5

Bild 24

BELASTUNGSEINRICHTUNG

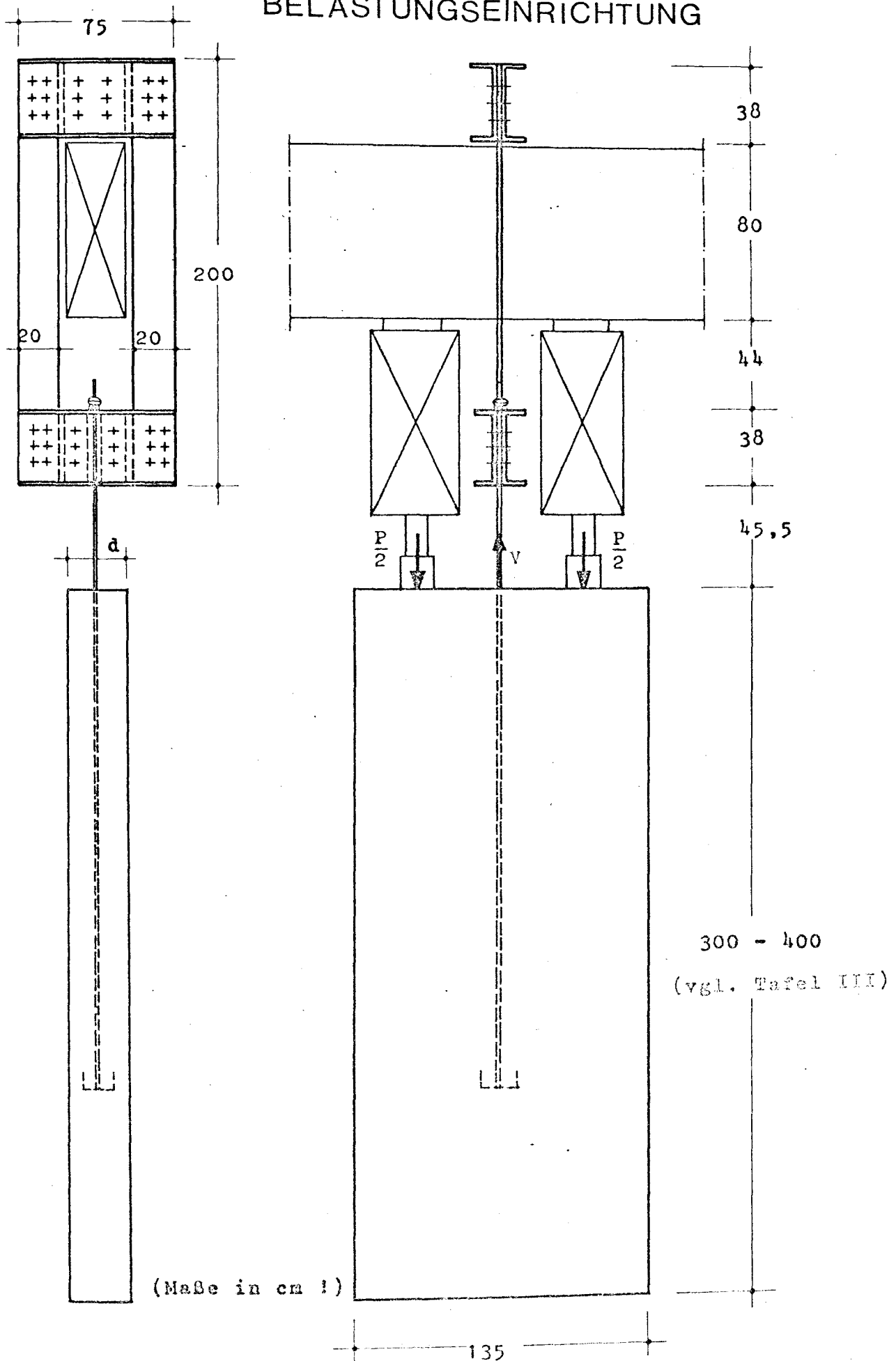
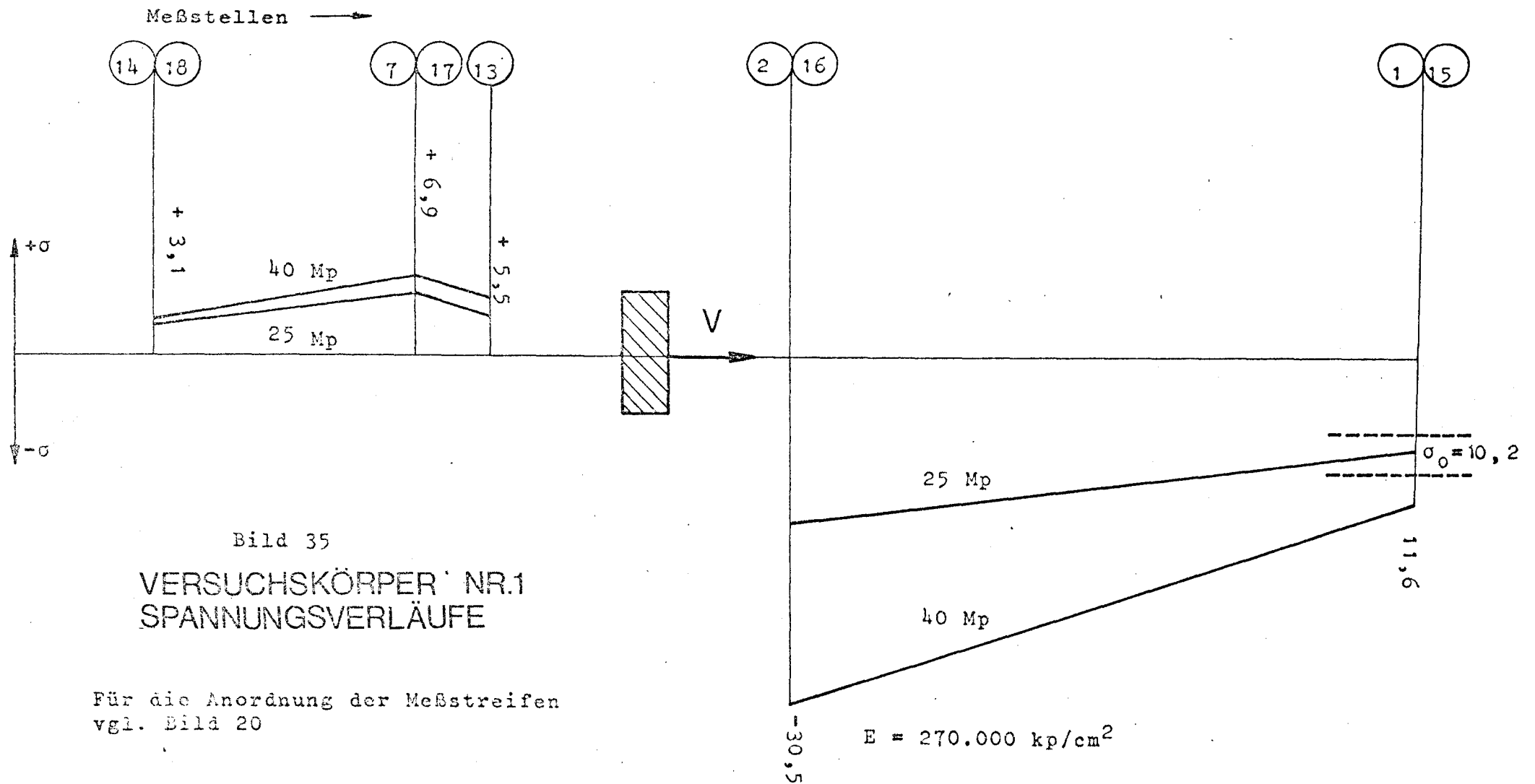


Bild 25



$$\sigma_0 = \frac{V}{b \cdot d} = \text{Durchschnittsspannung}$$

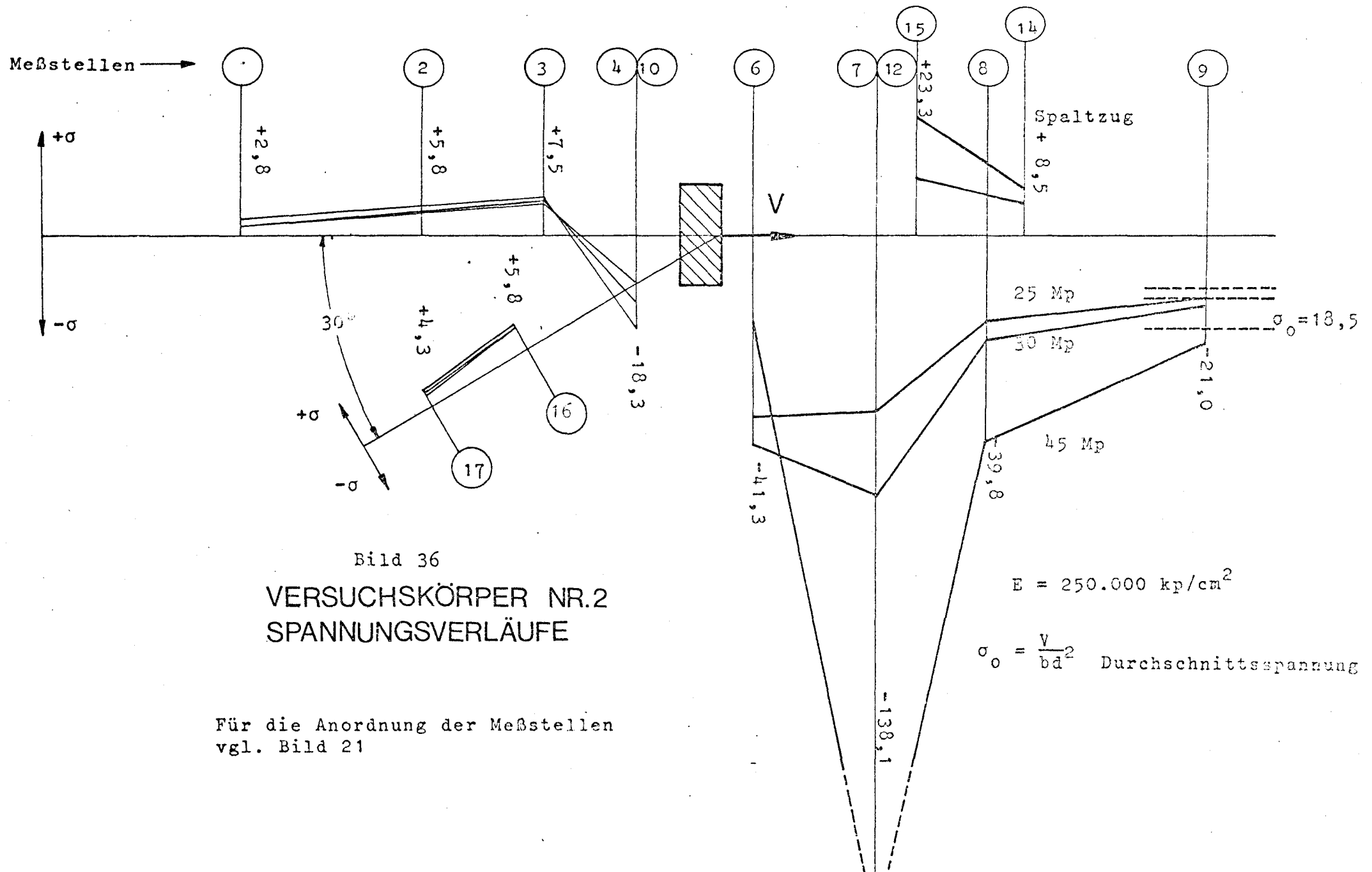
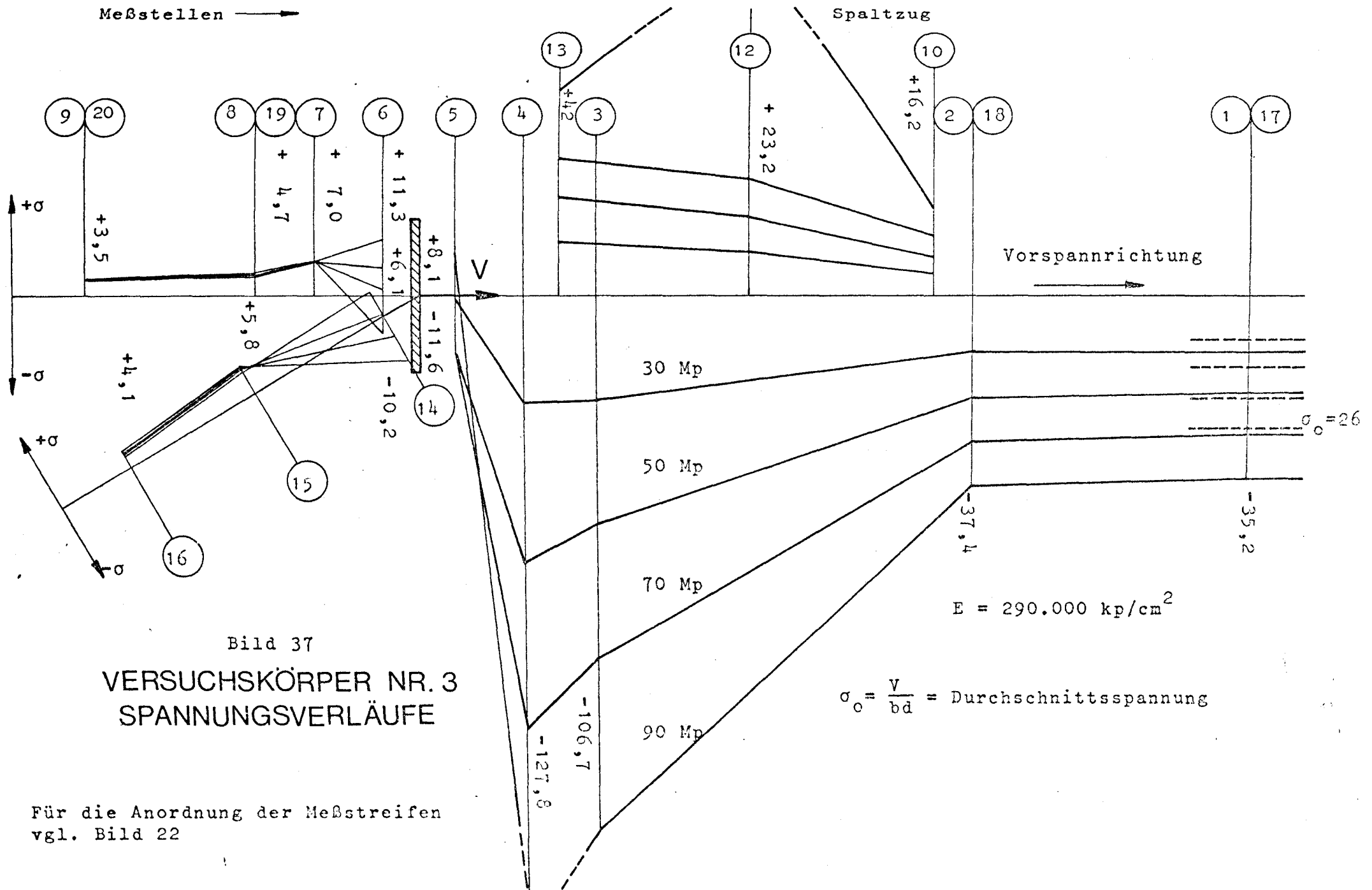
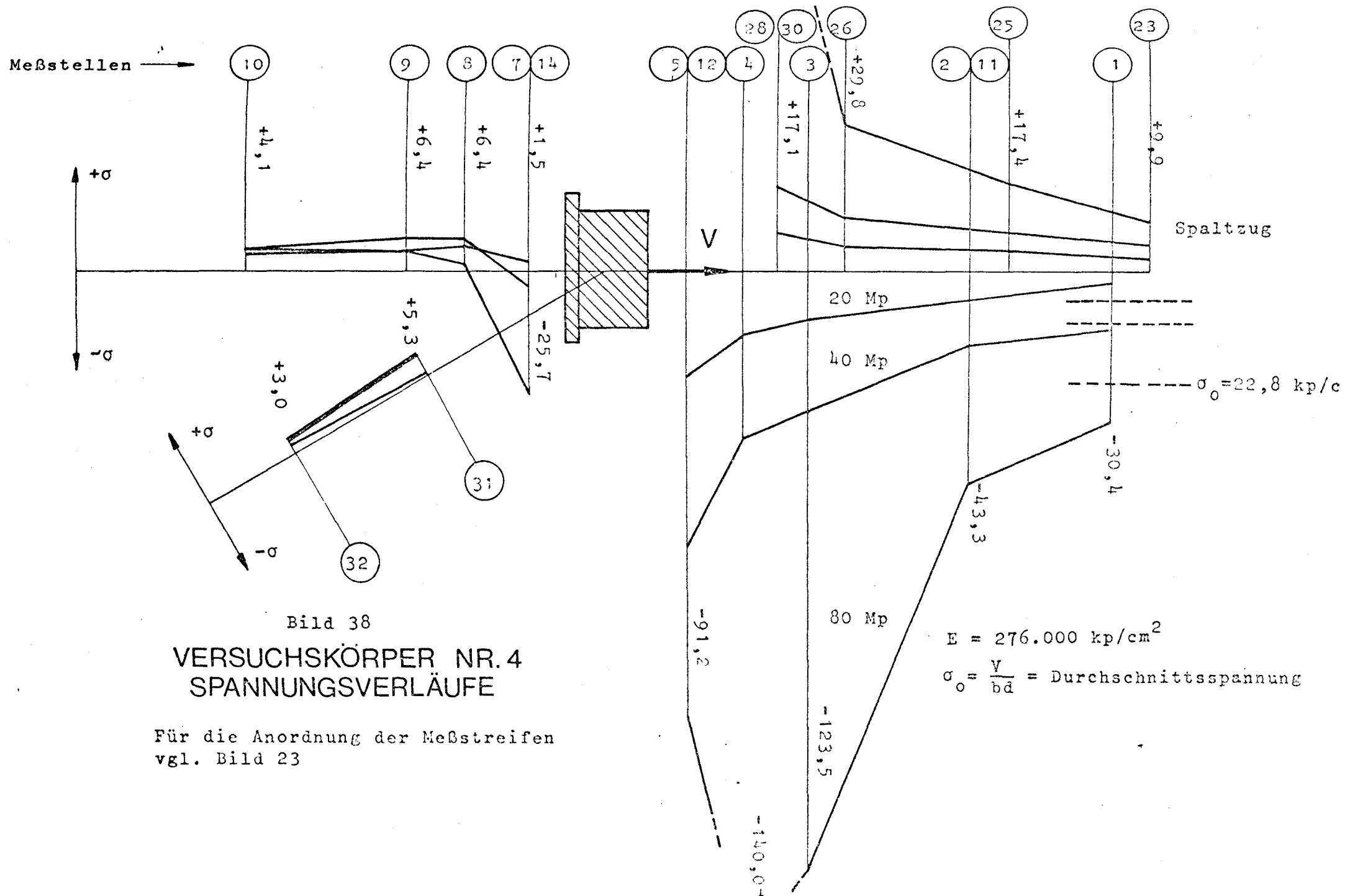
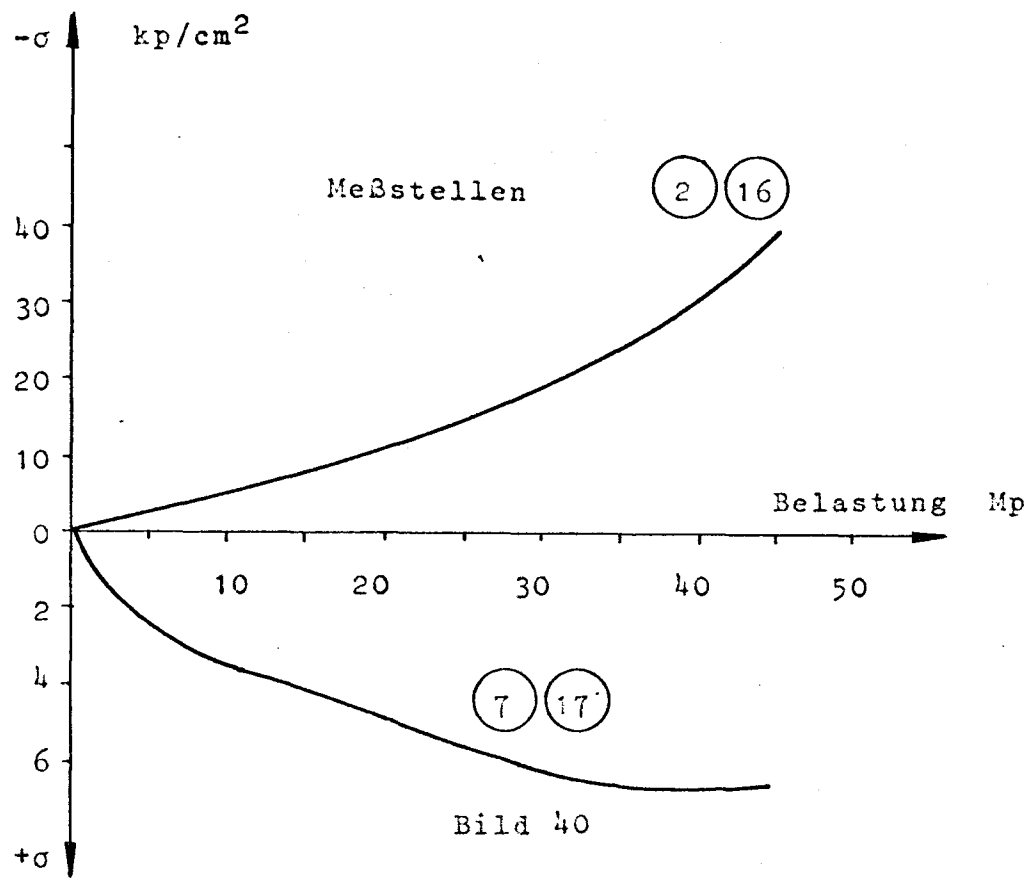


Bild 36
VERSUCHSKÖRPER NR.2
SPANNUNGSVERLÄUFE

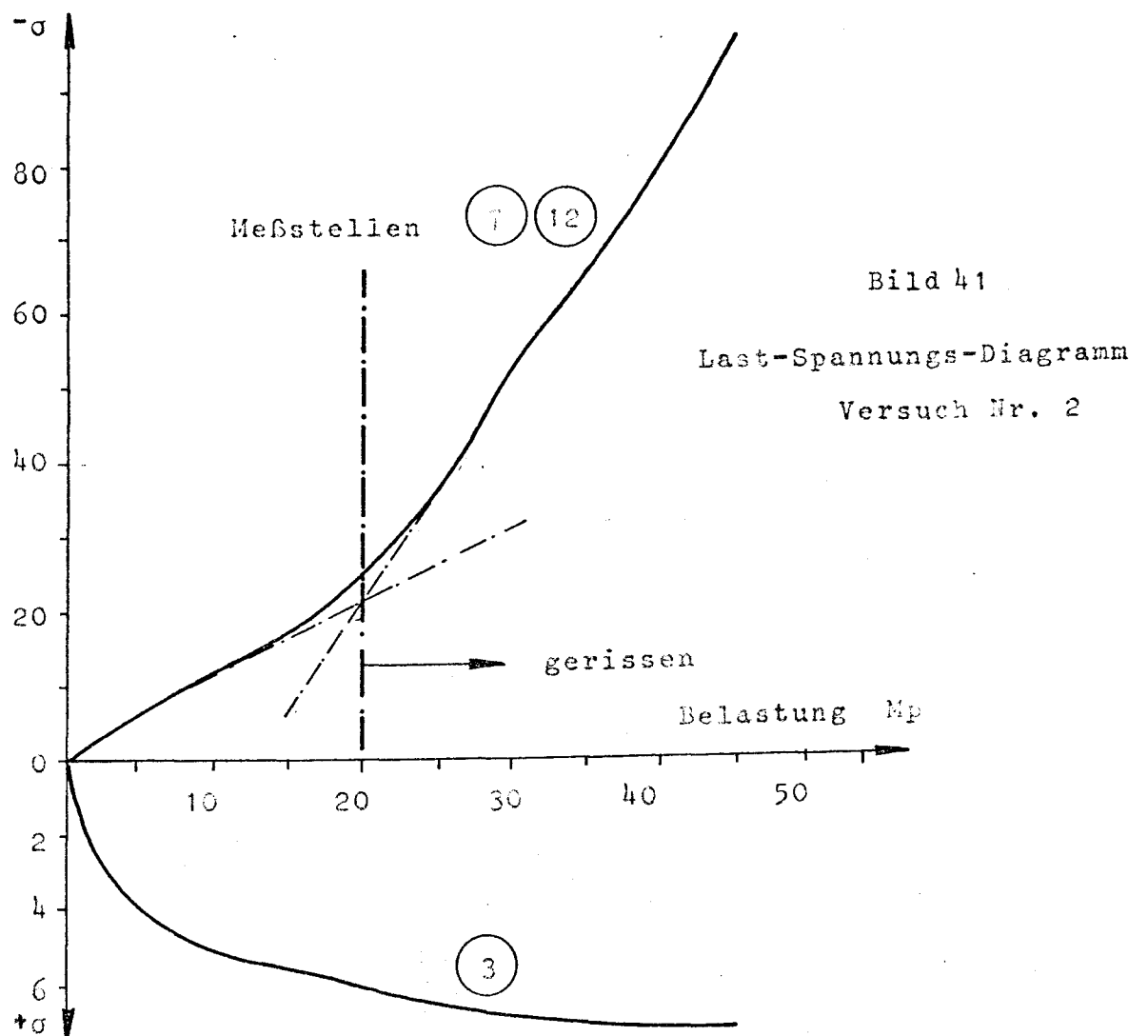
Für die Anordnung der Meßstellen
vgl. Bild 21

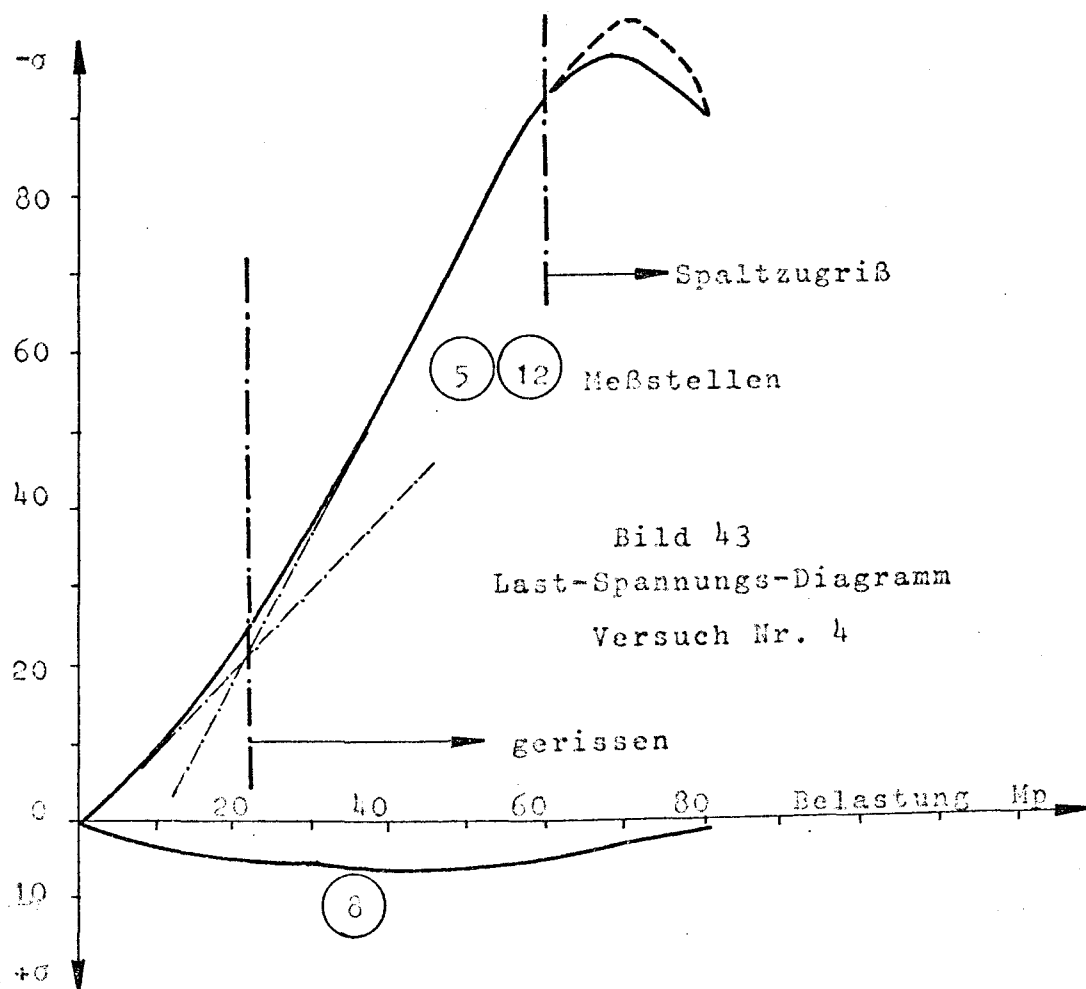
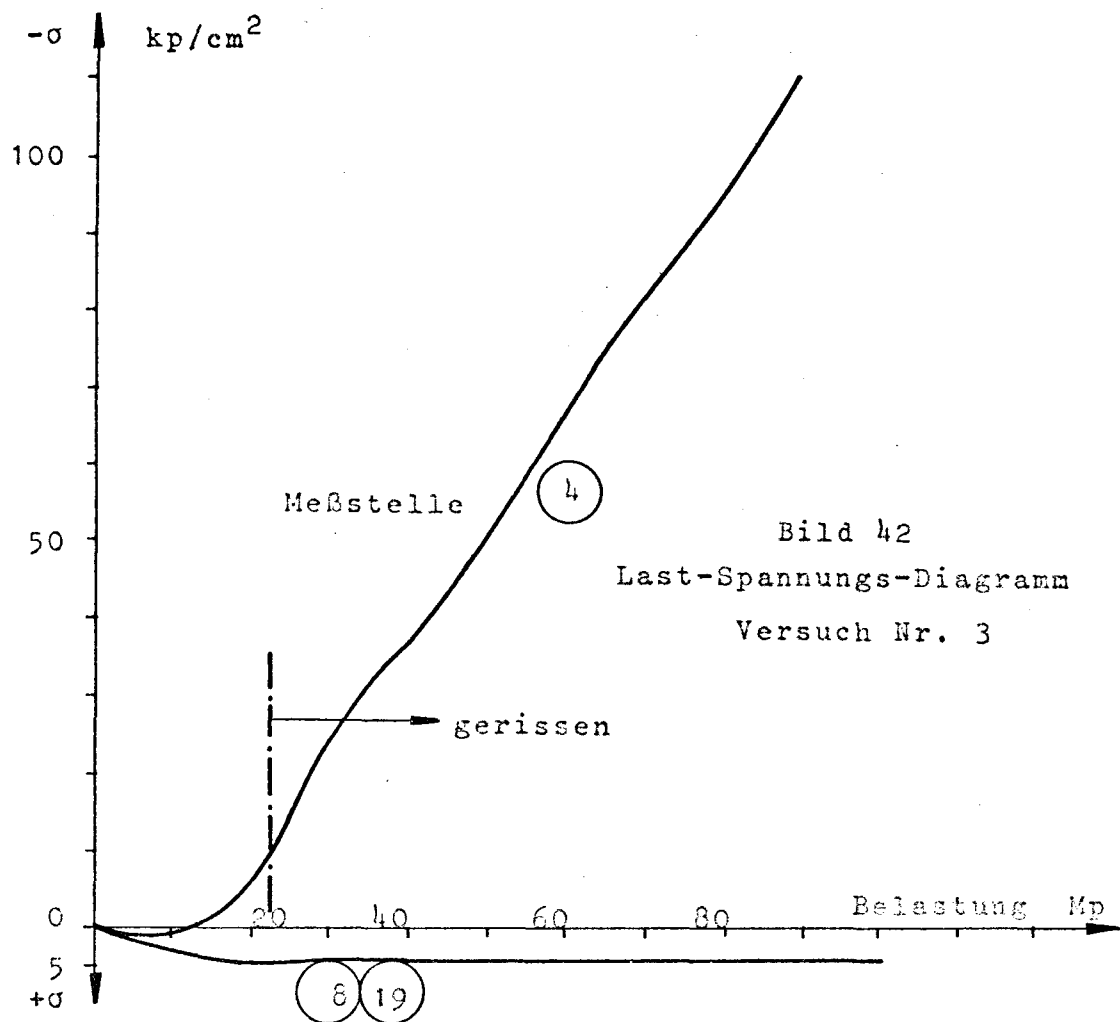


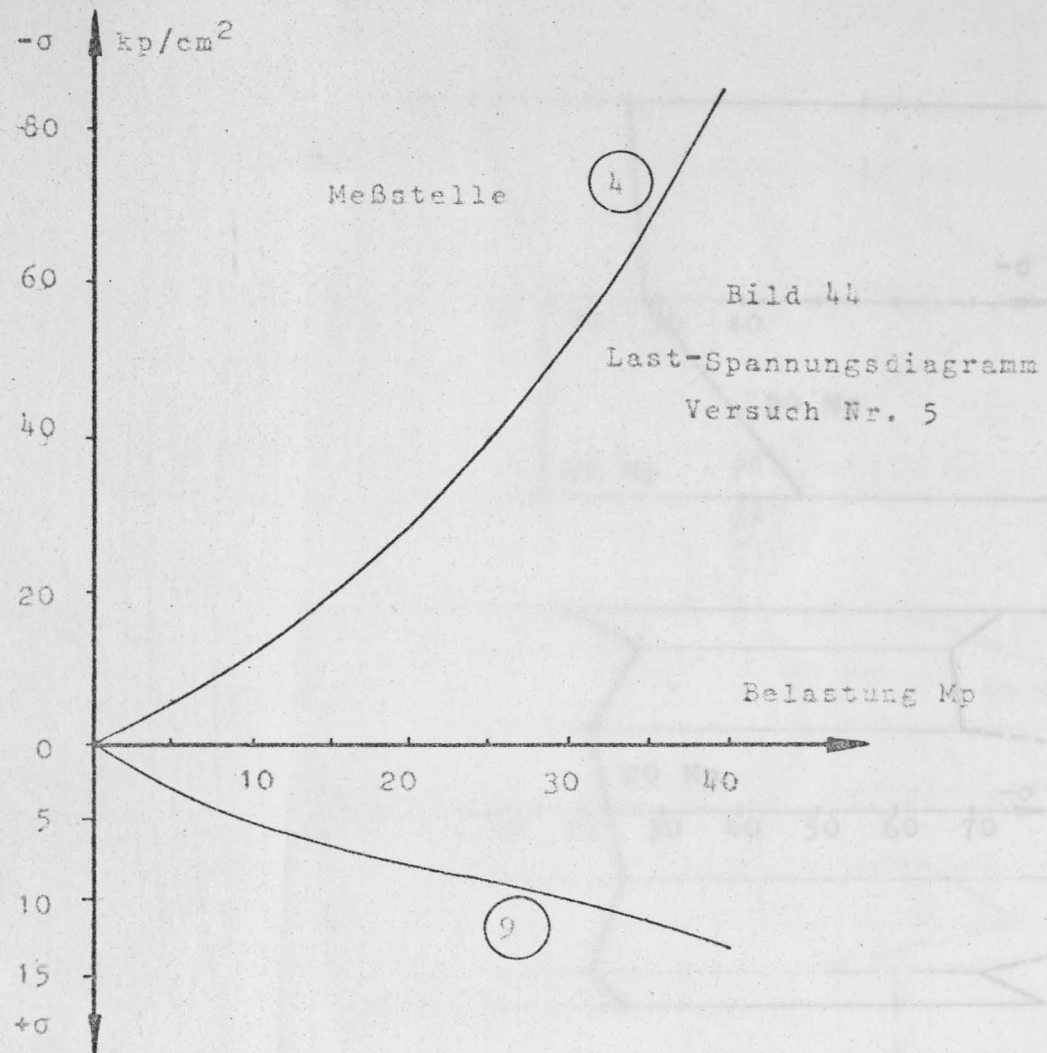




Last-Spannungs-Diagramm
Versuch Nr. 1







Scheibenzustand räuml. Zustand Scheibenzustand

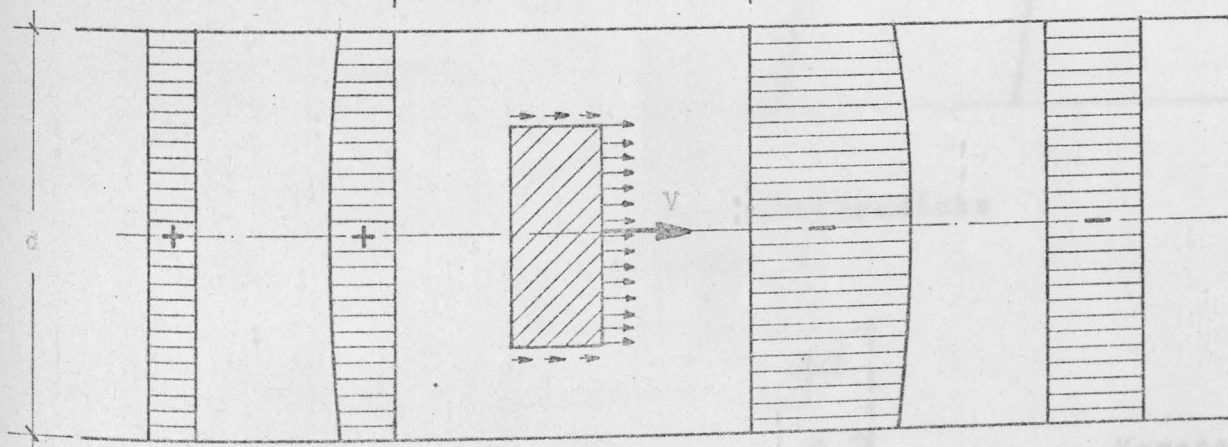


Bild 46

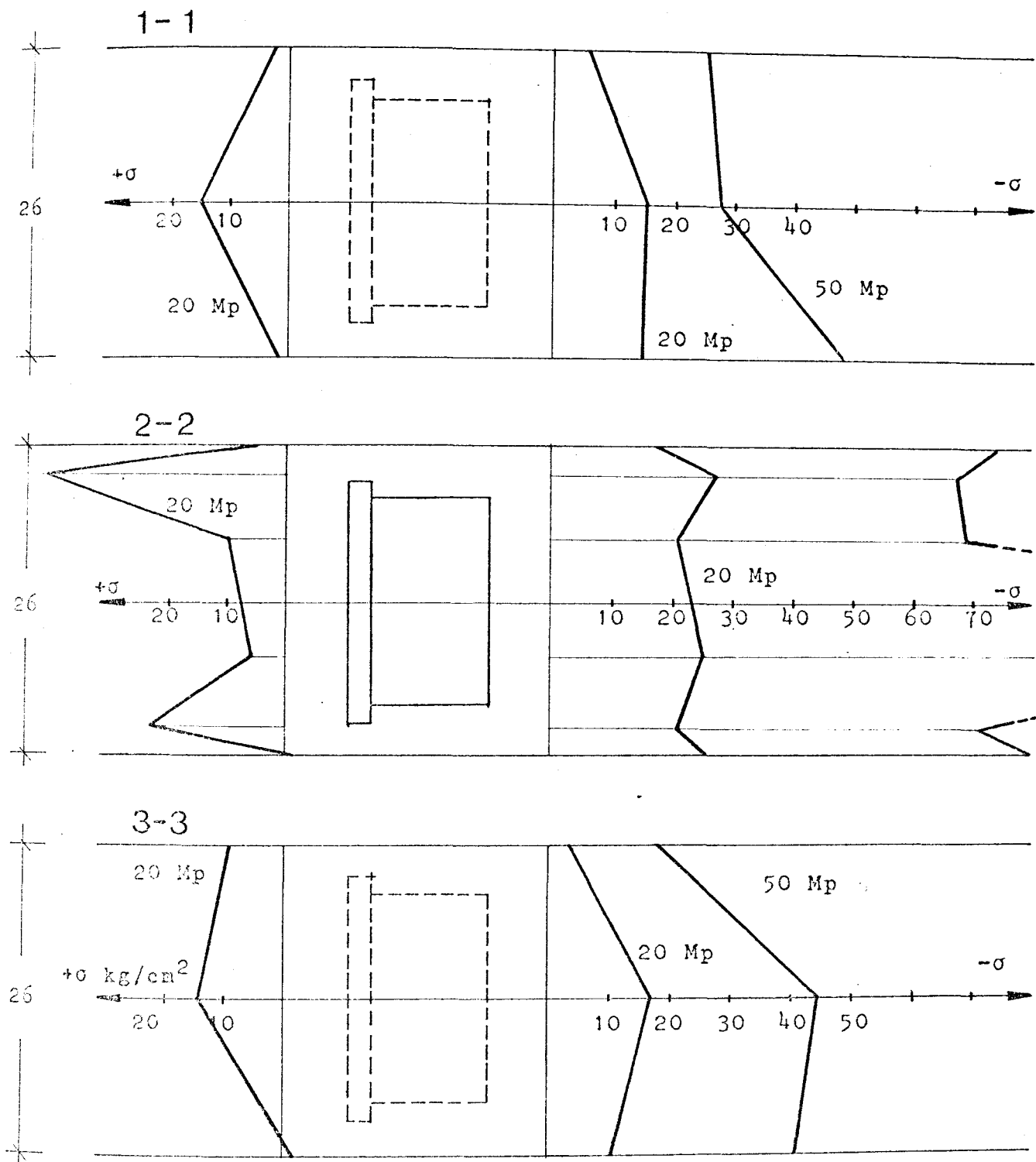
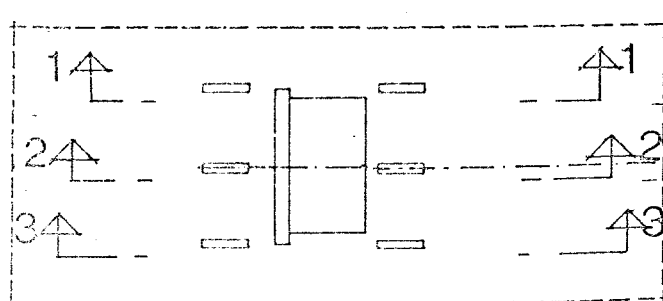


Bild 47

Spannungsverteilungen über die Scheibendicke

Versuch Nr. 4



Für die Anordnung der Meßstellen vgl. Bild 23

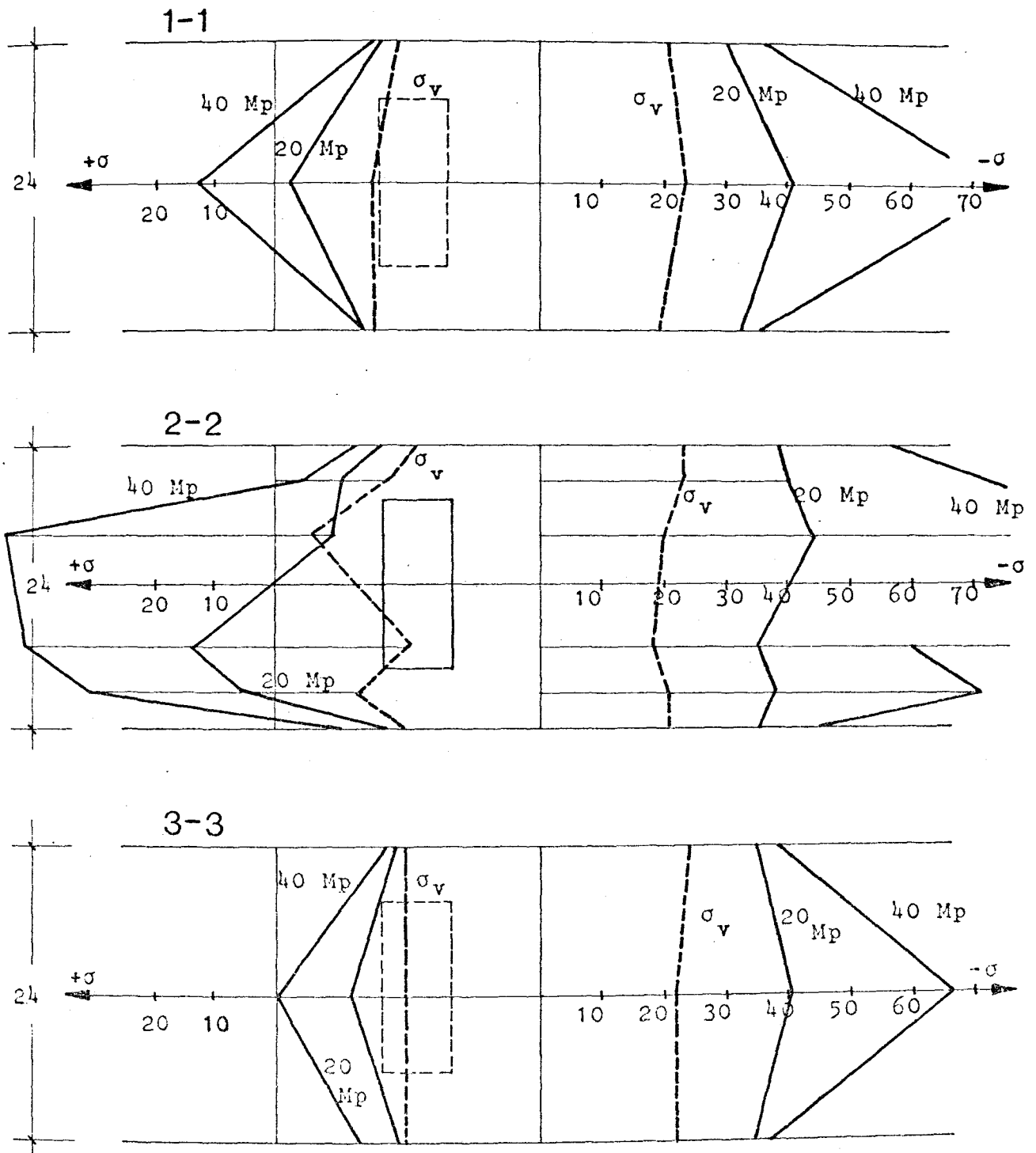
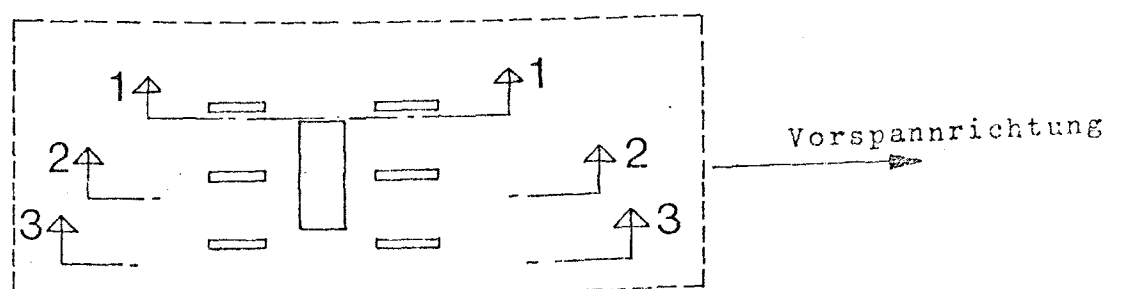


Bild 48

Spannungsverteilungen über die Scheibendicke
Versuch Nr. 5



Für die Anordnung der Meßstellen vgl. Bild 24

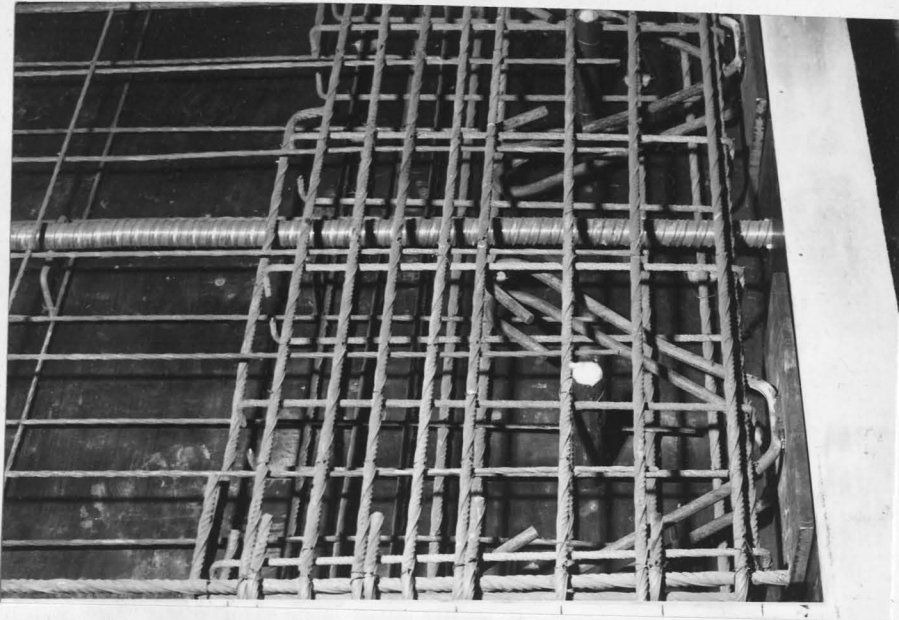


Bild 11 Detail der oberen Spaltzugbewehrung

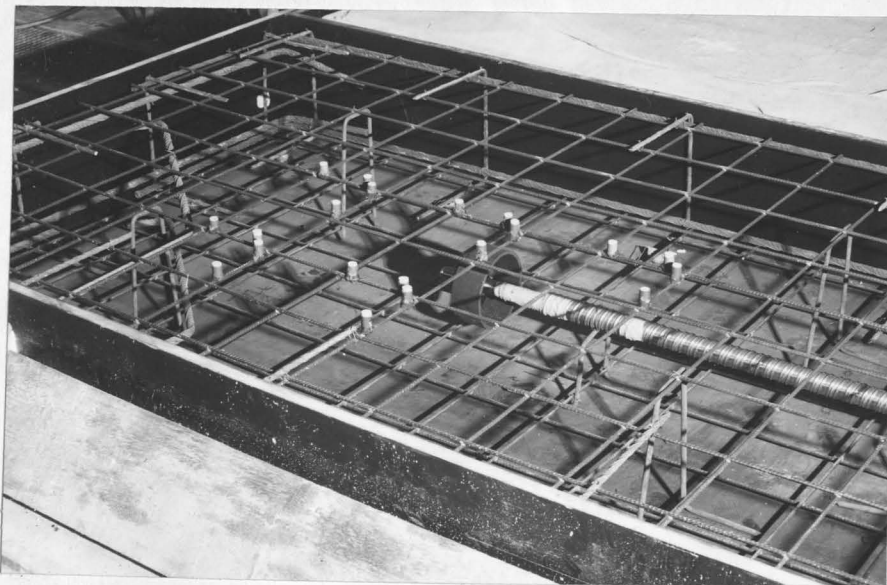


Bild 12 Versuch Nr. 1 - Ankerkopf

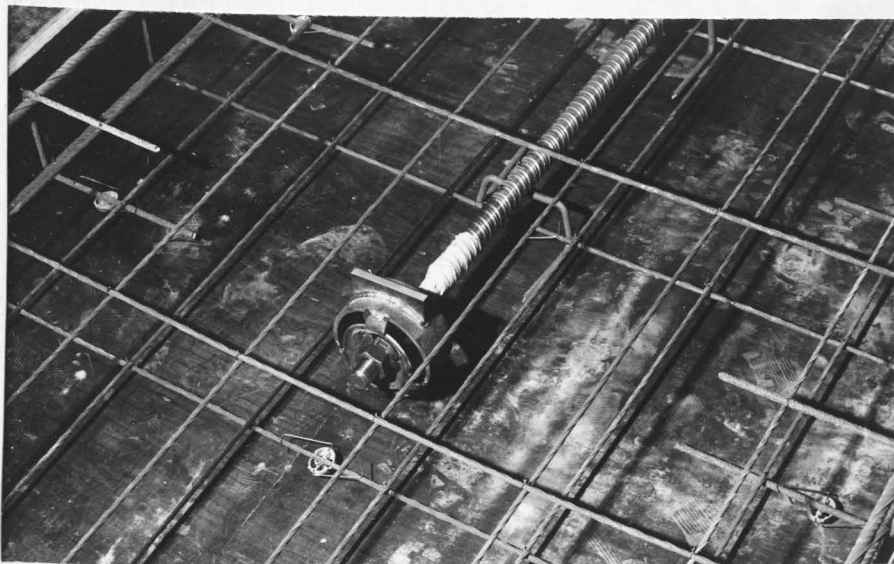


Bild 13 Versuch Nr. 2 - Ankerkopf

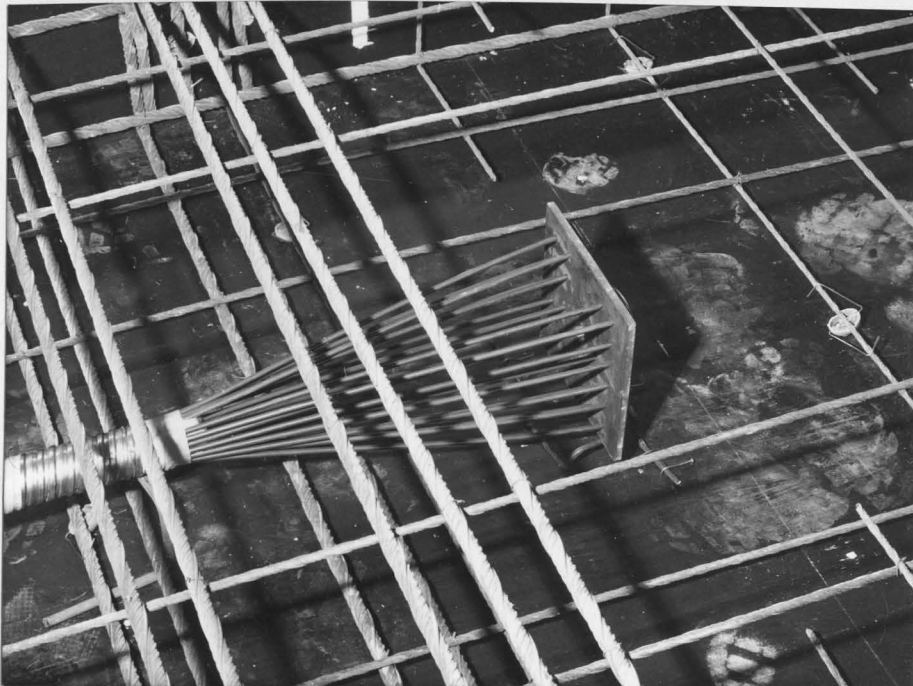


Bild 14 Versuch Nr. 3 - Ankerkopf

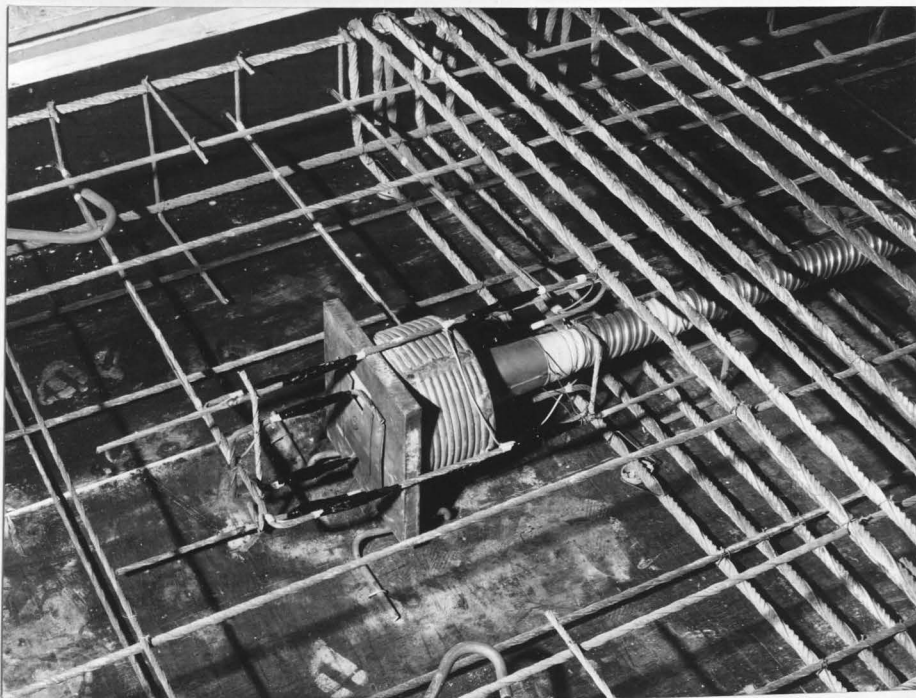


Bild 15 Versuch Nr. 4 - Ankerkopf

Bild 16 Versuch Nr. 5
Ankerkopf

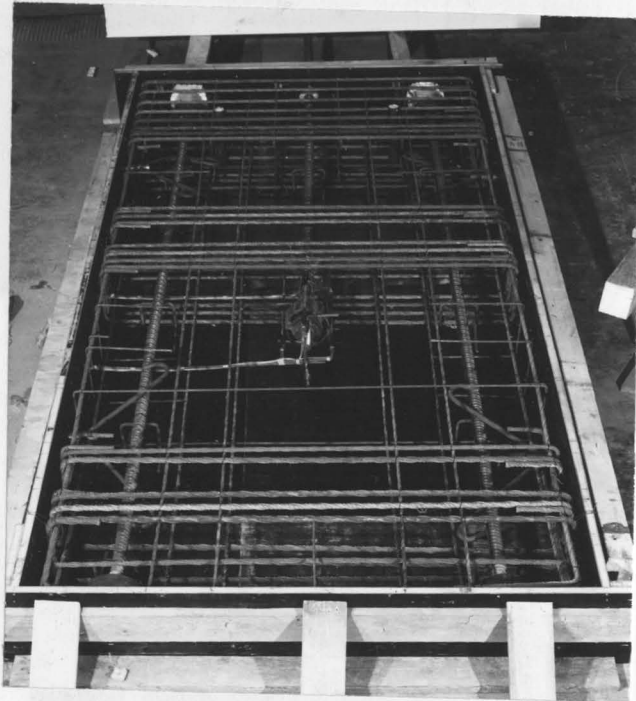
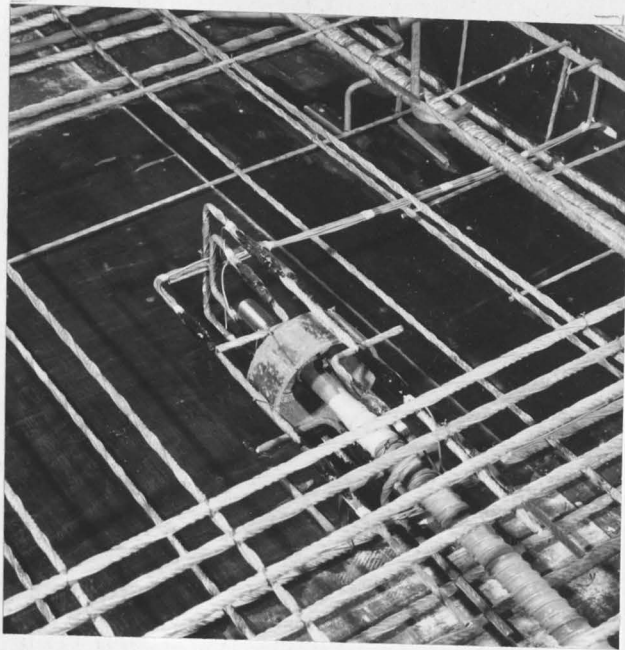
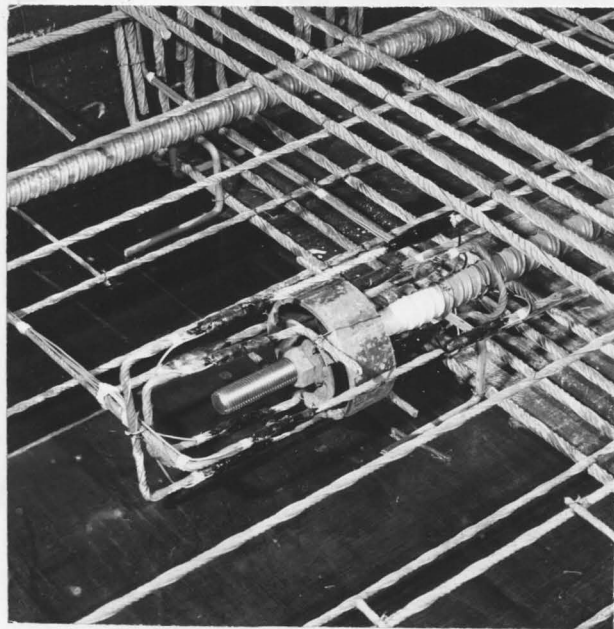


Bild 17 Versuch Nr. 5
Bewehrung

Bild 18 Versuch Nr. 5
Ankerkopf



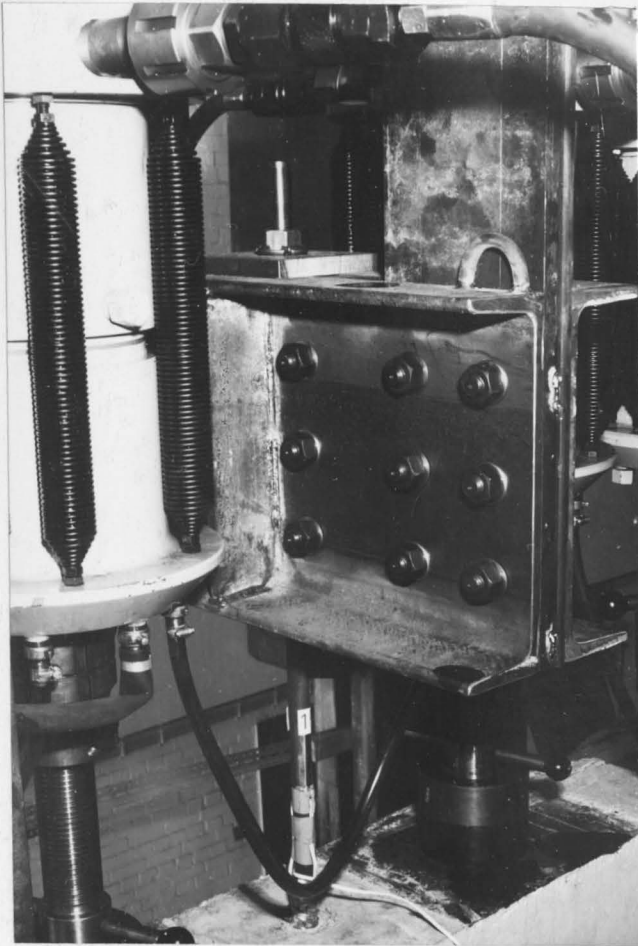


Bild 26 Verankerung der
Dyckerhoff-Spann-
glieder

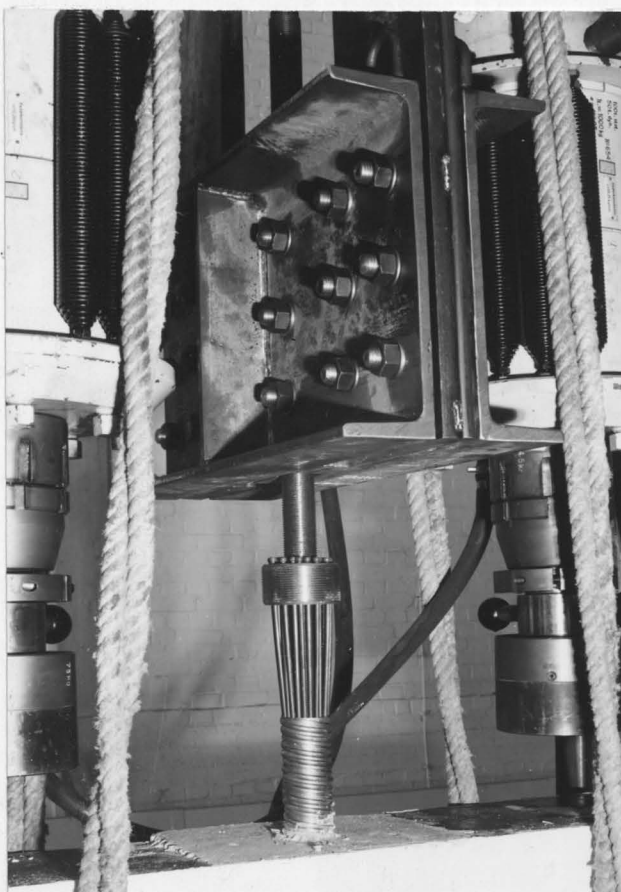


Bild 28 Verankerung der
BBRV-Glieder

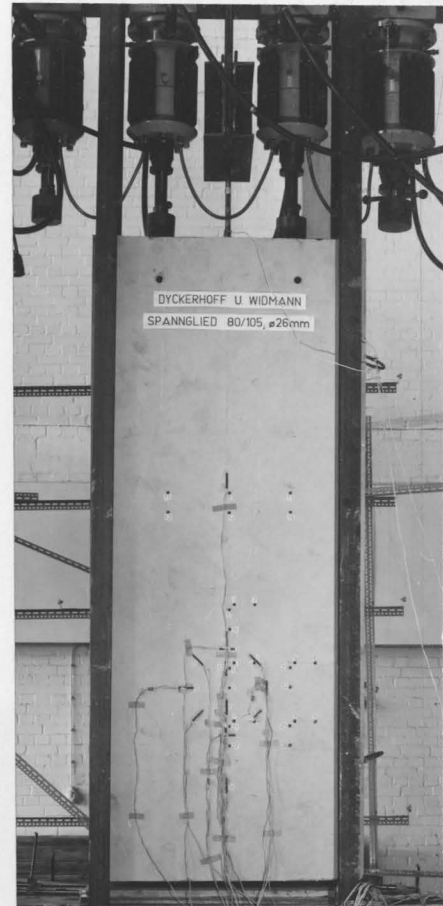


Bild 27 Versuchseinrichtung

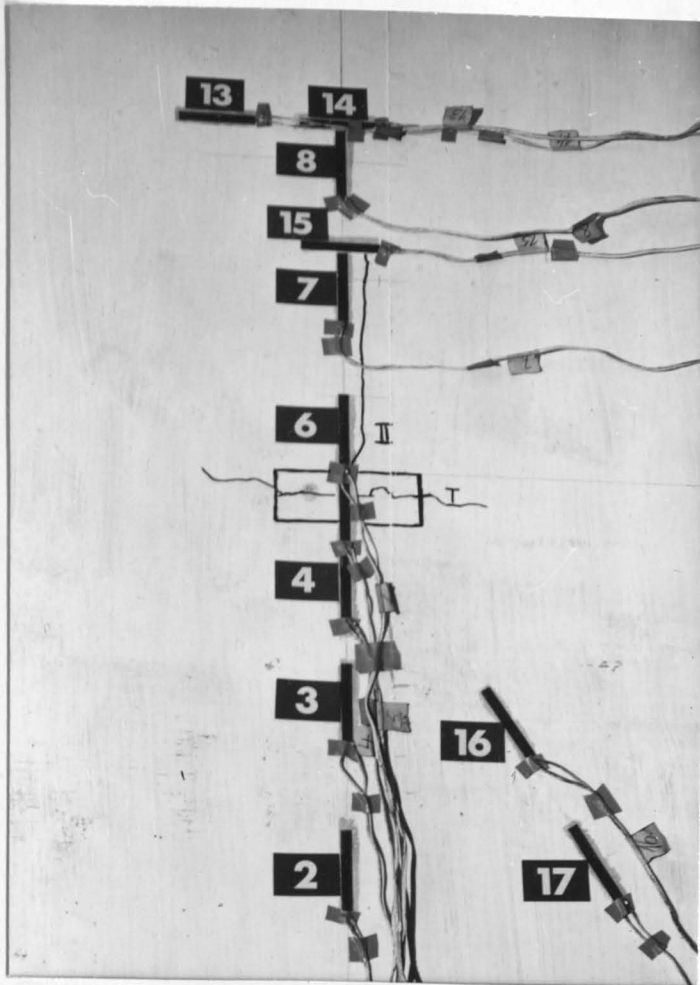
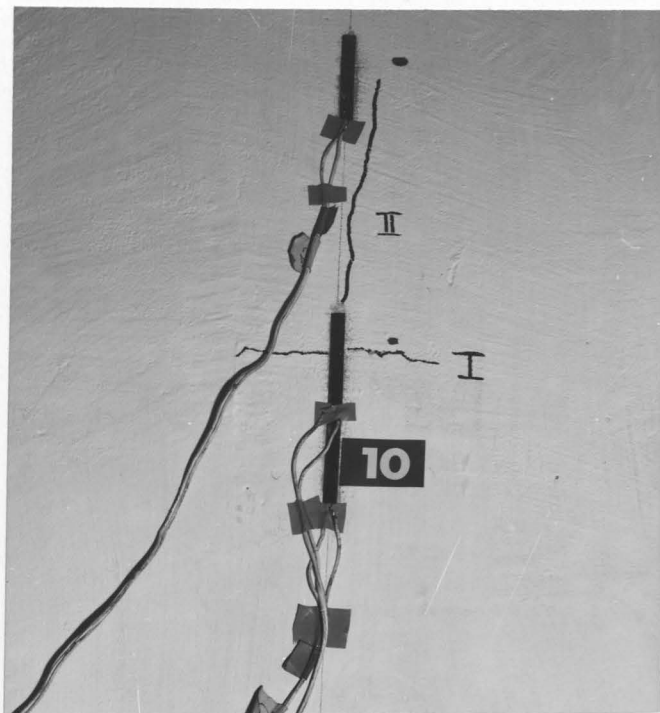


Bild 29 Versuch Nr. 2
Rißbild-Vorder-
seite

Bild 30 Versuch Nr. 2
Rißbild-Rückseite



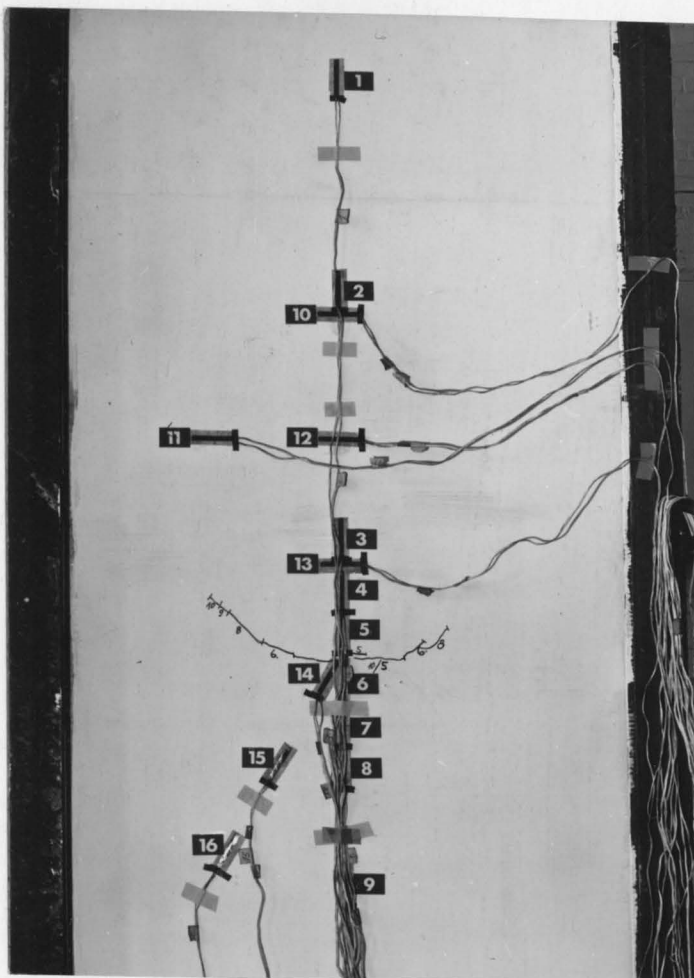
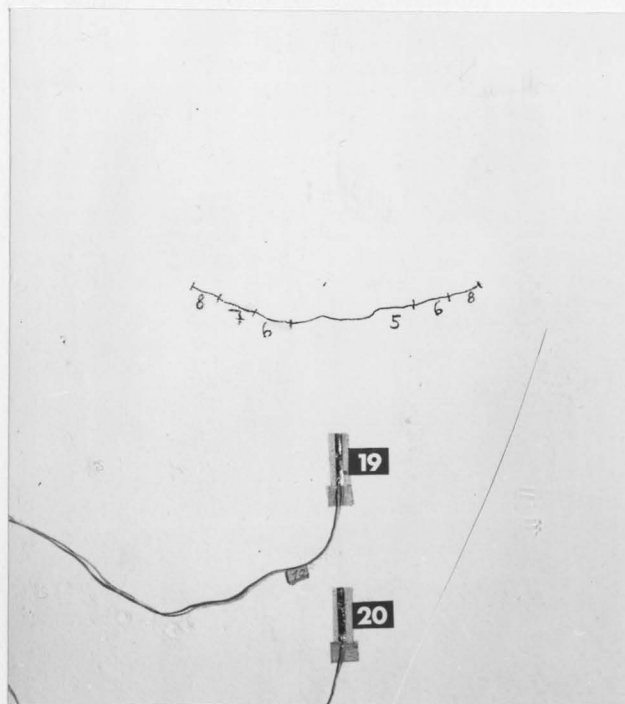


Bild 31 Versuch Nr. 3
Rißbild-Vorder-
seite

Bild 32 Versuch Nr. 3
Rißbild-Rückseite



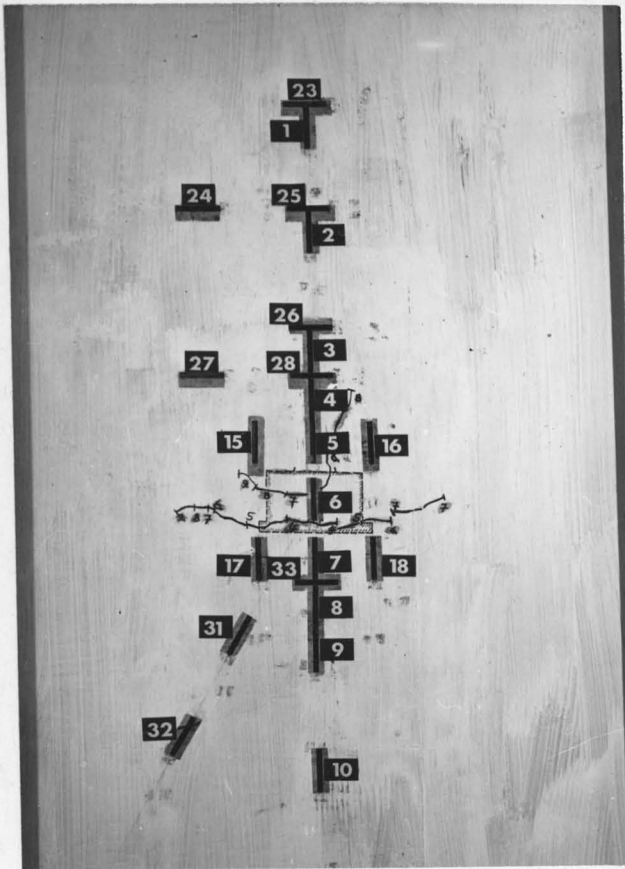
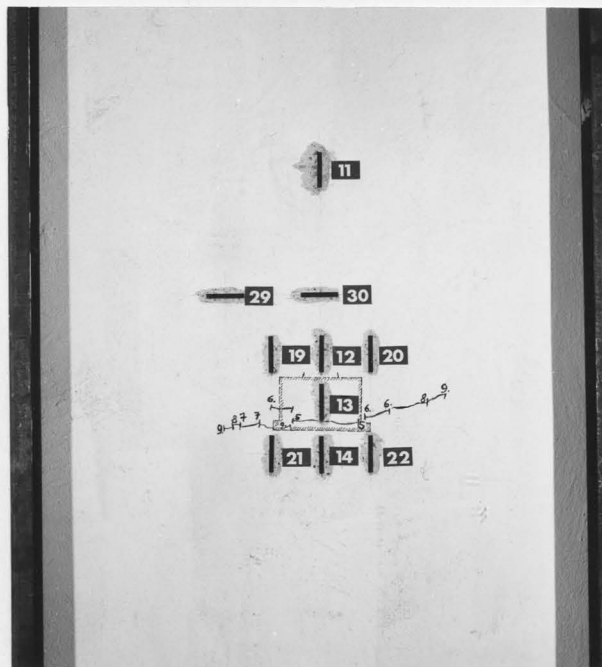


Bild 33 Versuch Nr. 4
Rißbild-Vorder-
seite

Bild 34 Versuch Nr. 4
Rißbild-Rück-
seite



28. März 2011
30-0530/001